

**VO₂MAX:N KORRELAATIO SUORAN TESTIN MAKSIMITEHOLLA TEHDYN
KUORMITUKSEN KESTOON JA HERMOLIHASJÄRJESTELMÄN SEKÄ
KESTÄVYYSSUORITUSKYVYN PALAUTUMISEEN**

Sasu Kaasinen

Liikuntafysiologian kandidaatintutkielma

Liikuntatieteellinen tiedekunta

Jyväskylän yliopisto

Kevät 2022

TIIVISTELMÄ

Kaasinen, S. 2022. VO₂max:n korrelaatio suoran testin maksimiteholla tehdyn kuormituksen keston ja hermolihasjärjestelmän sekä kestävyysuorituskyvyn palautumiseen. Liikuntatieteellinen tiedekunta, Jyväskylän yliopisto, liikuntafysiologian kandidaatintutkielma, 71 s.

Maksimaalisen hapenottokyvyn (VO₂max) merkityksestä palautumisessa löytyy kirjallisuudesta selkeää näyttöä. Suurin osa tästä näytöstä liittyy kuitenkin kuormitukseen, joissa palautumisjaksot ovat olleet lyhyet (alle pari minuuttia). VO₂max:n vaikutusta palautumiseen pidemmällä aikavälillä (10–15 minuuttia) on tutkittu vähemmän. Tämän tutkielman tarkoituksena oli selvittää, onko VO₂max:lla korrelaatiota hermolihasjärjestelmän ja kestävyysuorituskyvyn palautumiseen. Lisäksi tarkoituksena oli selvittää, onko VO₂max:lla korrelaatiota suoran testin maksimiteholla (P_{max}) tehdyn kuormituksen keston (T_{lim}).

Koehenkilöt ($n = 20$) olivat kamppailulajien urheilijoita. He suorittivat ensimmäisenä testipäivänä suoran testin, josta määritettiin P_{max} ja VO₂max. P_{max}-teholla tehtiin erillisenä päivänä kolme kuormitusta (P_{max}-testit) uupumukseen saakka. Testien välissä oli 15 minuutin tauko, jonka aikana koehenkilöt palautuivat passiivisesti. Ennen P_{max}-testejä sekä niiden jälkeen tehtiin hermolihasjärjestelmän testit. Hermolihasjärjestelmän testeinä olivat maksimaalinen isometrinen jalkaprässi (MVC) ja kevennyshyppy (CMJ). Suora testi ja P_{max}-testit tehtiin polkupyöräergometrillä. Hermolihasjärjestelmän (MVC:n ja CMJ:n tulokset) ja kestävyysuorituskyvyn (T_{lim}) palautumisen sekä T_{lim} korrelaatiota VO₂max:iin analysoitiin korrelaatiokertoimella.

Koehenkilöiden VO₂max oli 47.3 ± 7.1 ml/kg/min. VO₂max:lla ei havaittu tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota ensimmäisen P_{max}-testin T_{lim}:iin ($r = 0.056$, $p > 0.05$). Välittömästi P_{max}-testien jälkeinen väsymys ei ollut tilastollisesti merkitsevästi erilainen eri P_{max}-testeissä ($p > 0.05$). VO₂max:lla ei ollut tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota P_{max}-testien jälkeiseen väsymykseen ($r = 0.002$, $p > 0.05$). VO₂max:lla ei ollut myöskään tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota hermolihasjärjestelmän tai kestävyysuorituskyvyn palautumiseen ($r = 0.06$, $p > 0.05$).

Tutkielmassa korkeampi VO₂max ei ollut yhteydessä nopeamman hermolihasjärjestelmän tai kestävyysuorituskyvyn palautumisen kanssa. Korkeampi VO₂max ei myöskään ollut yhteydessä välittömästi intensiivisen kuormituksen jälkeiseen väsymykseen. Lisäksi korkeampi VO₂max ei ollut yhteydessä suoran testin maksimiteholla tehdyn testin uupumusajan kanssa. Potentiaalisia selityksiä näille löydöksille pohditaan tutkielmassa. Palautumisen ja VO₂max:in välisen positiivisen korrelaation puute saattaa liittyä muun muassa testien väliin palautusaikoihin, P_{max}-testien jälkeiseen väsymykseen ja koehenkilöiden harjoittelutaustaan.

Asiasanat: VO₂max, palautuminen, väsymys, P_{max}, T_{lim}

KÄYTETYT LYHENTEET

CMJ	countermovement jump, kevennyshyppy
MVC	maximal voluntary contraction, maksimaalinen tahdonalainen isometrinen voimantuotto
P_{\max}	suoran testin maksimiteho tai suoran testin $VO_2\max$:a vastaava teho
SR	sarkoplasminen retikulumi, luurankoli hasten sileä solulimakalvosto
T_{\lim}	uupumusaika suoran testin maksimiteholla tai suorassa testissä saavutetun $VO_2\max$:a vastaavalla teholla tehdyssä kuormituksessa
$VO_2\max$	maksimaalinen hapenottokyky
W'	mekaanisen työn määrä, jota voidaan tehdä kriittisen tehon yläpuolella

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

1	JOHDANTO.....	1
2	P _{MAX} JA T _{LIM} SEKÄ NIIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	2
2.1	Hapenoton kinetiikka.....	2
2.2	Kriittinen teho ja <i>W'</i>	6
2.2.1	Kriittisen tehon taustalla oleva fysiologia	9
2.2.2	<i>W'</i> :n taustalla oleva fysiologia	11
2.3	P _{max} ja T _{lim}	13
3	VÄSYMYS, PALAUTUMINEN JA VO ₂ MAX.....	20
3.1	Väsymys	20
3.2	Palautuminen	23
3.2.1	VO ₂ max ja palautuminen.....	24
3.2.2	VO ₂ max ja palautuminen armottoman kuormitusalueen kuormituksessa...27	
4	TUTKIMUSKYSYMYKSET JA HYPOTEESIT	32
5	TUTKIMUSMENETELMÄT	33
5.1	Koehenkilöt	33
5.2	Kuormitukset	33
5.3	Mittausmenetelmät, välineet ja muuttujat	35
5.4	Tilastollinen analyysi.....	37
6	TULOKSET	38
7	POHDINTA.....	45
7.1	T _{lim} ja VO ₂ max.....	45
7.2	VO ₂ max ja palautuminen.....	46
7.2.1	P _{max} -testien jälkeinen väsymys.....	46

7.2.2	Palautumisaika ja -tapa sekä luurankolihas-ten oksidatiivinen kapasiteetti	.47
7.2.3	Harjoittelutausta ja sarkoplasmisen retikulumin kalsiumin käsittely48
7.3	Tutkielman vahvuudet ja heikkoudet50
7.4	Johtopäätökset ja yhteenveto52
LÄHTEET	53

1 JOHDANTO

Kuormituksen intensiteetin kasvaessa hapenotto kasvaa progressiivisesti tiettyyn pisteeseen saakka, jolloin on saavutettu maksimaalinen hapenottokyky ($VO_2\text{max}$) eli maksimaalinen aerobisen aineenvaihdunnan nopeus (Bassett & Howley 2000). $VO_2\text{max}$ on yksi merkittävimmistä kestävyysuorituskykyyn vaikuttavista tekijöistä (Bassett & Howley 2000; Joyner & Dominelli 2021). Kestävyysuorituskykyyn vaikuttaa kuitenkin useita muitakin tekijöitä $VO_2\text{max}$:n lisäksi, kuten suorituksen taloudellisuus ja kyky työskennellä pitkään tietyllä osuudella $VO_2\text{max}$ ista (Joyner & Dominelli 2021). $VO_2\text{max}$:ia rajoittaa eniten minuuttitilavuus eli sydämen kyky pumpata verta työskenteleviin luurankolihasiin (Joyner & Dominelli 2021). Luurankolihasien oksidatiivinen kapasiteetti (kyky käyttää happea) onkin suurempi kuin elimistön kyky kuljettaa happea aktiivisille lihaksille (van der Zwaard ym. 2016).

Tässä työssä P_{max} (maximum power, maksimiteho) viittaa suoran testin maksimitehoon tai tehoon, jolla saavutetaan suorassa testissä $VO_2\text{max}$. P_{max} -testissä tehdään uupumukseen asti kuormitus P_{max} -teholla ja tämän kuormituksen uupumusaikaa kutsutaan T_{lim} :ksi (time limit of maintaining). $VO_2\text{max}$:a ja T_{lim} :iä saattavat rajoittaa eri tekijät, koska joissain tutkimuksissa niiden välillä on raportoitu negatiivinen korrelaatio (Billat ym. 1994b). $VO_2\text{max}$:n ja T_{lim} :n välillä voi olla myös positiivinen korrelaatio (Sousa ym. 2015) tai ei minkäänlaista korrelaatiota (Caputo & Denadai 2006). Lisäksi anaerobisen kapasiteetin korrelaatio T_{lim} :iin on ristiriitainen, joissain tutkimuksissa korrelaatio on ollut positiivinen (Renoux ym. 1999), mutta ei kaikissa (Midgley ym. 2007).

$VO_2\text{max}$:n ja palautumisen välillä on spekuloitu olevan riippuvuussuhde, varsinkin intervallikuormituksissa, joissa palautumisjaksot ovat lyhyet (Tomlin & Wenger 2001). Sen sijaan $VO_2\text{max}$:n merkitys suorituskyvyn palautumiseen pidemmällä palautumisjaksoilla (10–15 min) on tutkittu vähemmän. Esimerkiksi kamppailulajeissa ottelujen väliset tauot voivat olla 15 minuuttia.

Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää, onko $VO_2\text{max}$:illa korrelaatiota T_{lim} :iin kamppailulajien urheilijoilla, kun P_{max} on määritelty suoran testin maksimitehona. Lisäksi tässä tutkielmassa tarkastellaan $VO_2\text{max}$:n korrelaatiota kestävyysuorituskyvyn ja hermolihasjärjestelmän palautumiseen 10–15 minuutin palautumisjaksoilla.

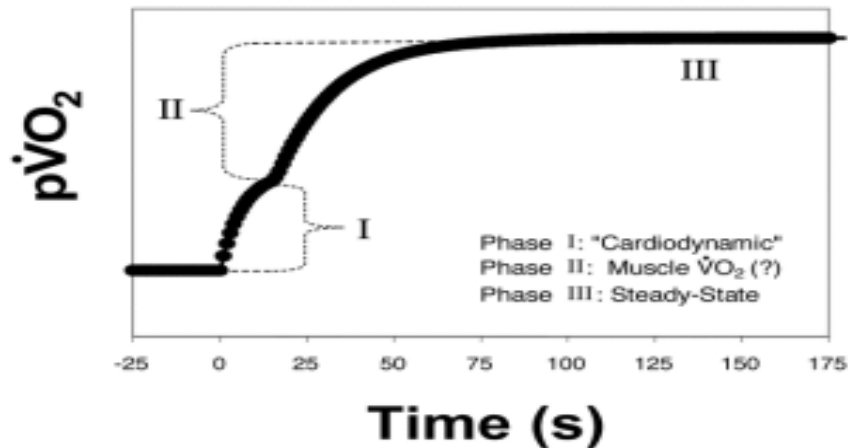
2 P_{MAX} JA T_{LIM} SEKÄ NIIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Tässä luvussa käsitellään P_{max}:iin (suoran testin maksimiteho tai teho, jossa saavutetaan suorassa testissä VO_{2max}) ja T_{lim}:iin (P_{max}:n kesto) vaikuttavia tekijöitä. Molempiin liittyy olennaisesti hapenoton kinetiikka eli hapenoton nousu kuormituksen vaatimalle tasolle. Hapenoton kinetiikka vaikuttaa kriittiseen tehoon ja *W'*:hen (work eli työ), jotka perustuvat hyperboliseen kuormituksen teho-kestokäyrään, joka voidaan havaita useissa erityyppisissä kuormituksissa. Kriittinen teho erottaa kuormitusalueet, jossa hapenotossa steady state-tila eli tasapainotila on saavutettavissa (raskas kuormitusalue) ja jossa steady state-tila ei ole saavutettavissa (armoton kuormitusalue). Kriittisen tehon yläpuolella voidaan tehdä rajallinen määrä mekaanista työtä, jota kuvastaa *W'*. Kriittisen tehon ja *W'*:n avulla voidaan potentiaalisesti selittää P_{max}:iin ja T_{lim}:iin liittyviä ristiriitaisia tuloksia. Näitä ovat muun muassa VO_{2max}:n positiivinen, negatiivinen tai olematon korrelaatio T_{lim}:iin ja miksi anaerobisella kapasiteetilla ei aina ole havaittu korrelaatiota T_{lim}:iin.

2.1 Hapenoton kinetiikka

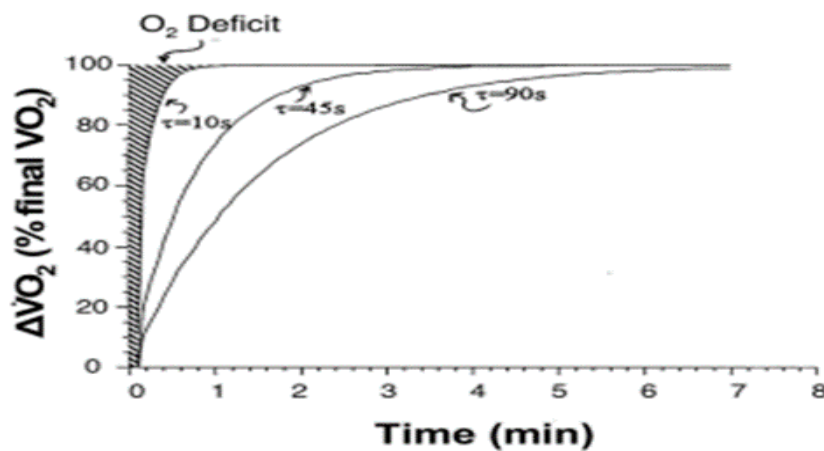
Hapenoton kinetiikalla viitataan hapenoton kasvuun kuormituksen vaatimalle tasolle. Hapenotto kasvaa matalilla tai kohtalaisilla kuormitustehoilla kahdessa vaiheessa steady-state eli tasapainotilaan (Jones & Poole 2005), kuten kuvassa 1 näkyy. Näistä vaiheista ensimmäisessä (kardiodynaaminen komponentti) hapenotto keuhkoissa kasvaa, mutta tämä hapenoton kasvu ei vielä kuvasta aktiivisten lihasten hapenkulutusta vaan minuuttitilavuuden kasvua (Jones & Poole 2005). Tämä selittyy sillä, että veri ei ole vielä tässä vaiheessa ehtinyt palata aktiivisista lihaksista keuhkoihin (Robergs 2014). Tämä ensimmäinen vaihe kestää noin 15–20 sekuntia, jonka jälkeen alkaa hapenoton primäärinen komponentti, jossa hapenotto nousee kohti steady-state tilaa (Jones & Poole 2005).

Hapenoton primäärisestä komponentista tarkastellaan tyypillisesti, miten nopeasti se kasvaa (aikavakio) tai miten paljon se kasvaa (amplitudi). Amplitudi on pitkälti riippuvainen kuormituksen intensiteetistä, minkä takia tarkastelun kohteena on tyypillisesti nopeus. Amplitudin korkeuden merkitys korostuu vuorostaan intensiivisissä kuormituksissa.



KUVA 1. Hapenoton kinetiikkaa (Jones & Poole 2005). Cardiodynamic, kardiodynaaminen vaihe. Muscle $\dot{V}O_2$, luurankoli hasten hapenkulutus. $p\dot{V}O_2$, hapenotto keuhkoissa.

Hapenoton primäärisen komponentin nopeus kuvastaa aktiivisten lihasten hapenkulutuksen kasvua (Rossiter ym. 2002). Hapenoton nousun nopeuden merkitystä steady-state tasolle havainnollistetaan kuvassa 2. Nopeampi hapenoton primäärinen komponentti vähentää anaerobisen aineenvaihdunnan osuutta intensiivisen kuormituksen alussa (Temesi ym. 2017).



KUVA 2. Hapenoton primäärisen komponentin nopeuden ja happivajeen yhteys (Jones & Poole 2005). Nopeampi hapenoton primäärinen komponentti eli pienempi aikavakio (τ) mahdollistaa pienemmän happivajeen (O_2 deficit) kertymisen kuormituksen alussa tai kuormituksen intensiteetin kasvaessa.

Hapenoton primäärisen komponentin nopeutta ja $\dot{V}O_{2max}$:a rajoittavat eri tekijät (Inglis ym. 2021). $\dot{V}O_{2max}$:a rajoittaa hapenkuljetus aktiivisille lihaksille (Joyner & Dominelli 2021), mutta hapenoton primäärisen komponentin nopeutta näyttäisi rajoittavan sen sijaan pääasiassa viiveet luurankoli hasten oksidatiivisen fosforylaation aktivoinnissa (Poole & Jones 2012;

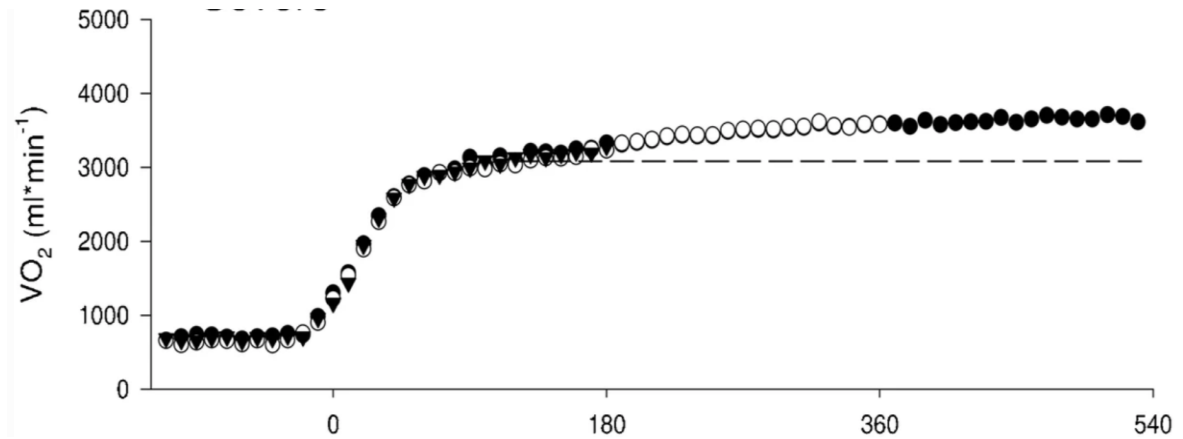
Grassi ym. 2021). Hapenkuljetuksen rooli hapenoton primäärisessä komponentissa kasvaa korkeilla kuormituksen intensiteeteillä, mutta merkittävin rajoite on silti itse lihassolujen mitokondrioissa (Poole & Jones 2012; Grassi ym. 2021).

Tyyppin I lihassoluilla on suurempi luurankolihasen oksidatiivinen kapasiteetti tyyppin II lihassoluihin verrattuna (Essen ym. 1975). Tyyppin I lihassolujen osuudella ja hapenoton primäärisen komponentin amplitudilla tai nopeudella onkin raportoitu selkeä yhteys joissain (Barstow ym. 1996; Pringle ym. 2003), mutta ei kaikissa tutkimuksissa (Scheuermann & Barstow 2003). Erot saattavat selittyä tutkimusmetodologisilla tekijöillä, kuten eroissa kuormitusten intensiteeteissä sekä esimerkiksi Scheuermannin ja Barstowin (2003) tutkimuksessa erot lihassolutyypin jakaumassa olivat pieniä. Lisäksi huippukestävyysurheilijoilla tyyppin II lihassolujen oksidatiivinen kapasiteetti voi olla yhtä suuri kuin tyyppin I lihassolujen (Ortenblad ym. 2018).

Kestävyysharjoittelu nopeuttaa hapenoton primääristä komponenttia muun muassa nopeuttamalla oksidatiivisen fosforylaation aktivaatiota (Zoladz ym. 2014). Hapenoton primäärisen komponentin nopeus ja luurankolihasen oksidatiivinen kapasiteetti ovat tyypillisesti suurempia korkealla kuin matalalla VO_{2max} :lla (Figueira ym. 2008; Lagerwaard ym. 2019). Sen sijaan hapenoton primäärisen komponentin nopeus ei välttämättä enää kasva sen jälkeen, kun VO_{2max} on noin 55–60 ml/kg/min (Inglis ym. 2020). Hapenoton primäärisen komponentin nopeudella ja VO_{2max} :lla ei välttämättä olekaan selkeää yhteyttä kestävyysharjoitelleilla henkilöillä (Carter ym. 2000; Caputo & Denadai 2004; Inglis ym. 2021). Niin ikään luurankolihasen mitokondrioiden oksidatiivinen kapasiteetti ei välttämättä korreloi VO_{2max} :n kanssa kestävyysurheilijoilla (Gifford ym. 2016). Täten adaptaatiot mitokondrioiden oksidatiivisessa kapasiteetissa ja VO_{2max} :ssa eivät välttämättä kulje käsi kädessä.

Kohtalaisella kuormituksen intensiteetillä (alle aerobisen kynnyksen) hapenotto saavuttaa steady-state tilan 2–3 minuutissa, mutta kuormituksen intensiteetin ollessa yli aerobisen kynnyksen, hapenotto ei saavuta steady-statea yhtä nopeasti (Poole & Jones 2012). Sen sijaan hapenotto jatkaa hidastaa nousuaan ja steady-state tila saatetaan saavuttaa vasta noin 15 minuutin päästä kuormituksen alusta (Poole ym. 1988). Tämä ilmiö tunnetaan hapenoton hitaana komponenttina (Poole & Jones 2012), jota mallinnetaan kuvassa 3. Hapenoton hitaan komponentin takia pitkäkestoisessa kuormituksessa yli aerobisen kynnyksen hapenoton ja

kuormituksen tehon suhde nousee korkeammalle kuin kuormituksessa alle aerobisen kynnyksen (Barstow & Mole 1991). Toisin sanoen, mekaaninen hyötysuhde eli mekaanisen työn ja energiankulutuksen suhde laskee. Tällöin ATP:n (adenosiinitrifosfaatin) tuotto suhteessa hapenkulutukseen laskee tai lihassupistuksen ATP:n kustannus kasvaa eli tietyn työn tekeminen vaatii enemmän ATP:tä (Poole & Jones 2012).



KUVA 3. Hapenoton hidan komponentti (Colosio ym. 2020). Katkoviiva kuvastaa hapenottoa, joka saavutettiin primäärisessä komponentissa. Hapenoton kasvua tämän kohdan yli kutsutaan hapenoton hitaaksi komponentiksi.

Hapenoton hitaan komponentin amplitudi kasvaa kuormituksen intensiteetin kasvaessa (Colosio ym. 2020), tosin vain tiettyyn pisteeseen asti. Korkeilla kuormituksen intensiteeteillä arviolta yli 80 % hapenoton hitaasta komponentista liittyy aktiivisiin lihaksiin (Poole ym. 1991). Tällöin hapenoton hitaan komponentin amplitudiin voi kasvattaa lisääntynyt motoristen yksiköiden rekrytointi, erityisesti epätaidellisten tyypin II lihassolujen lisääntynyt aktiivisuus kuormituksessa (Krustrup ym. 2004). Suuri tyypin I lihassolujakauma vaikuttaisikin olevan yhteydessä pienempään hapenoton hitaaseen komponenttiin (Barstow ym. 1996; Pringle ym. 2003).

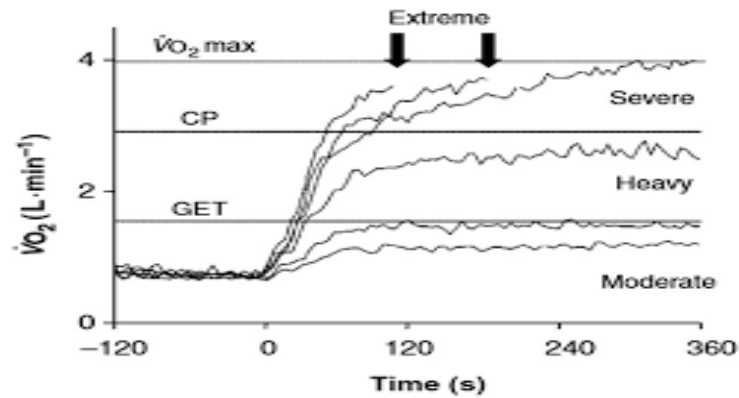
Hapenoton hitaan komponentin taustalla voi olla myös aineenvaihduntatuotteiden kasaantuminen, kuten protonien (Zoladz ym. 2016) ja epäorgaanisen fosfaatin (Goulding ym. 2021). Nopeampi (tai suurempi) hapenoton primäärinen komponentti intensiivisen kuormituksen alussa pienentää happivajetta ja aineenvaihduntatuotteiden kasaantumista, mikä laskee hapenoton hitaan komponentin amplitudia. Kestävyysharjoittelulla voidaan pienentää hapenoton hitaan komponentin amplitudia, mikä voidaan selittää muun muassa hapenoton primäärisen komponentin parantumisella kuormituksen alussa (Zoladz ym. 2016).

Valmistavalla kuormituksella voidaan parantaa hapenoton kinetiikka ja myös suorituskykyä korkean intensiteetin kuormituksessa (Bailey ym. 2009; Poole & Jones 2012). Korkean intensiteetin valmistava kuormitus (aerobisen kynnyksen ja $VO_2\text{max}$:n puolivälissä) voi kasvattaa T_{lim} :iä jopa 70 % (Jones ym. 2003). Valmistava kuormitus ei siis tarkoita tässä tapauksessa pelkkää lämmittelyä, sillä pelkkä lihasten tai sisälämpötilan nosto ei paranna suorituskykyä korkean intensiteetin kuormituksessa (Poole & Jones 2012). Liian lyhyt (alle 10 minuuttia) palautusjakso valmistavan ja varsinaisen kuormituksen välillä (Bailey ym. 2009), liian kevyt tai liian intensiivinen valmistava kuormitus eivät aiheuta parannusta suorituskyvyssä (Burnley ym. 2011).

Yhteenvetona voidaan todeta, että hapenoton primäärisen komponentin nopeutuminen tai amplitudin kasvu näkyy parempana suorituskyynä paitsi tasavauhtisessa kuormituksessa, myös esimerkiksi suorassa testissä, jossa kuorma kasvaa progressiivisesti. Nopeamman tai suuremman primäärisen komponentin ansiosta tietyllä absoluuttisella intensiteetillä myös hapenoton hidaskomponentti voi pienentyä, johtaen taloudellisempaan suoritukseen ja suorituskyvyn parantumiseen. Hapenoton hitaan komponentin takia hapenotto voi nousta maksimiin asti pidempikestoisessa intensiivisessä tasavauhtisessa kuormituksessa, vaikka kuormituksen teho olisi alle suoran testin maksimitohon.

2.2 Kriittinen teho ja W'

Kuormitukset voidaan jakaa erilaisiin kuormitusalueisiin, kuormitusten aiheuttamien hapenoton vasteiden mukaan (Jones & Poole 2005), kuvan 4 mukaisesti. Armottomalla kuormitusalueella (kriittisen tehon yläpuolella) hapenotto ei saavuta steady-statea vaan hapenotto jatkaa kasvuaan hapenoton hitaan komponentin takia, kunnes hapenotto saavuttaa maksimin (Hill ym. 2002). Tämä tutkielma keskittyy pääasiassa juuri armottomaan kuormitusalueen kuormitukseen. Kriittisen tehon yläpuolella tapahtuva kuormitus viittaa tässä tutkielmassa nimenomaan armottomaan kuormitusalueen kuormitukseen.



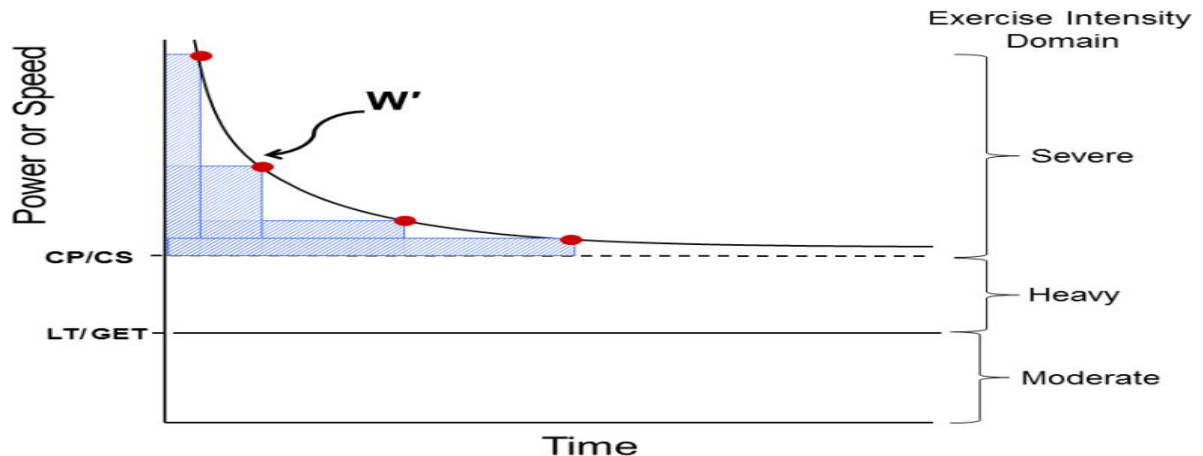
KUVA 4. Erilaiset kuormitusalueet hapenoton vasteiden perusteella (Poole & Jones 2012). Kaasujenvaihtokynnys (GET) erottaa kohtalaisen (ei hidasta komponenttia hapenotossa) ja raskaan kuormitusalueen (hidas komponentti havaittavissa, mutta steady-state tila saavutettavissa). Kriittinen teho (CP) erottaa raskaan ja armottoman (severe) kuormitusalueen (ei steady-statea, hapenotto kasvaa maksimiin asti). Äärimmäisessä (extreme) kuormitusalueessa hapenotto ei ehdi kasvaa maksimiin asti.

Monod ja Scherrer (1965) määrittivät alun perin kriittisen tehon lihaksen tai lihasryhmän maksimaaliseksi tehoksi, jota voidaan tehdä todella pitkän aikaa ilman väsymystä. Sittemmin määritelmä on tarkentunut ja kriittinen teho kuvastaa suurinta oksidatiivista aineenvaihduntaa, jota voidaan ylläpitää ilman, että W' vähenee (Poole ym. 2016). W' kuvastaa mekaanista työtä, jota voidaan tehdä kriittisen tehon yläpuolella (Moritani ym. 1981). Kriittisen tehon alapuolella (raskaassa kuormitusalueessa) voidaan saavuttaa aineenvaihdunnallinen steady-state tila; kriittisen tehon yläpuolella (armottomassa kuormitusalueessa) tämä ei ole enää mahdollista (Poole ym. 2016). Täten kriittisen tehon alapuolella muun muassa happamuus ja fosfokreatiinin pitoisuudet sekä hapenotto saavuttavat tasapainotilan (Vanhatalo ym. 2016). Juuri kriittisen tehon alapuolella tehdyn kuormituksen uupumusaika on hyvin yksilöllinen (20–67 min), mutta keskimäärin noin 40 minuuttia (Black ym. 2017). Kriittisen tehon yläpuolella happamuus lisääntyy, fosfokreatiinitasot laskevat aina uupumukseen saakka (eli kun W' on käytännössä katsoen nolla) ja hapenotto saavuttaa maksimin (Vanhatalo ym. 2016).

Raimundon ym. (2019) tutkimuksessa hyvin harjoitelleilla kestävyyspyöräilijöillä armoton kuormitusalue oli keskimäärin 84–129 % suoran testin tehosta, jossa saavutettiin VO_{2max} . Toisin sanoen tällä alueella esimerkiksi hapenotto pystyy saavuttamaan maksimin, mikäli kuormitusta jatketaan tarpeeksi pitkään. Kriittisen tehon suhteessa VO_{2max} :iin voi olla kuitenkin vaihtelua: terveillä ja nuorilla henkilöillä 70–80 %, kestävyysurheilijoilla 80–90 %

VO₂max:sta (Poole ym. 2016), joten myös armottomassa kuormitusalueessa voi olla yksilöiden välillä suurta vaihtelua. Kriittinen teho sijaitsee lähes samoilla tehoilla tai suhteellisella osuudella VO₂max:sta kuin anaerobinen kynnyks. Kriittisellä teholla on korrelaatio erilaisten laktaattiin ja ventilaatioon perustuviin kynnyksiin (Galan-Rioja ym. 2020). Kriittinen teho vaikuttaisi kuitenkin tyypillisesti olevan hieman korkeammalla kuin esimerkiksi MLSS (maximal lactate steady state) eli suurin kuormitustaso, jossa veren laktaattipitoisuus saavuttaa tasapainotilan (Galan-Rioja ym. 2020; Nixon ym. 2021).

Kuvassa 5 havainnollistetaan kriittistä tehoa, W' :tä ja hyperbolista teho-kestokäyrää. W' :n on ajateltu olevan vakio kaikilla kriittisen tehon yläpuolella tehtävillä kuormituksilla (Poole ym. 2016), mistä on näyttöä myös käytännössä (de Souza ym. 2016). W' ei kuitenkaan todennäköisesti ole täysin vakio erilaisissa kuormituksissa. W' voi esimerkiksi olla suurempi, jos tehoa lasketaan juuri ennen uupumusta verrattuna siihen, että kuormitus olisi tehty samalla teholla uupumukseen saakka (Dekerle ym. 2015). Samoin kuormituksen lopussa väsymyksen kasaantuessa, tehontuottokyky ei ole yhtä suurta kuin kuormituksen alussa. Täten W' :tä ei voida hyödyntää samalla tavalla väsymyksessä eli se laskee väsymyksessä (Chidnok ym. 2013c).



KUVA 5. Kriittinen teho (CP) ja W' (Poole ym. 2016). Kriittinen teho ja W' voidaan määrittää tekemällä 3–5 tasatehoista kuormitusta (kesto 2–15 min) uupumukseen saakka. Punaiset pallot kuvastavat tehtyjä kuormituksia. Suorakulmion muotoiset laatikot kuvastavat W' :tä, joka on yhtä suuri tai lähes yhtä suuri uupumukseen asti tehdyillä erikestoisilla kuormituksilla kriittisen tehon yläpuolella. Täten esimerkiksi kuormituksen kesto tietyllä teholla armottomassa (severe) kuormitusalueessa on ennustettavissa. LT, laktaattikynnyks. GET, kaasunvaihtokynnyks eli hiilidioksidin tuoton kasvu suhteessa hapenottoon.

Sen sijaan kuormituksessa, jossa teho kasvaa jatkuvasti (kuten suora testi), W' saattaa olla pienempi kuin tasatehoisessa kuormituksessa (Black ym. 2016). Toisaalta suoran testin ja tasatehoisen kuormituksen W' :llä on lähes lineaarinen riippuvuussuhde (Black ym. 2016). Koska W' on (lähes) vakio, kuormituksen kesto tietyllä teholla on ennustettavissa, mikäli henkilön kriittinen teho ja W' on tiedossa. Kriittinen teho -mallin avulla voidaan myös ennustaa kestävyysuorituskykyä esimerkiksi aika-ajossa (Black ym. 2014; Morgan ym. 2019). Suorituksen keston ennustus ja kriittisen tehon sekä W' :n määrittäminen perustuu alla olevaan kaavaan

$$T_{\text{lim}} = W' / (P - CP)$$

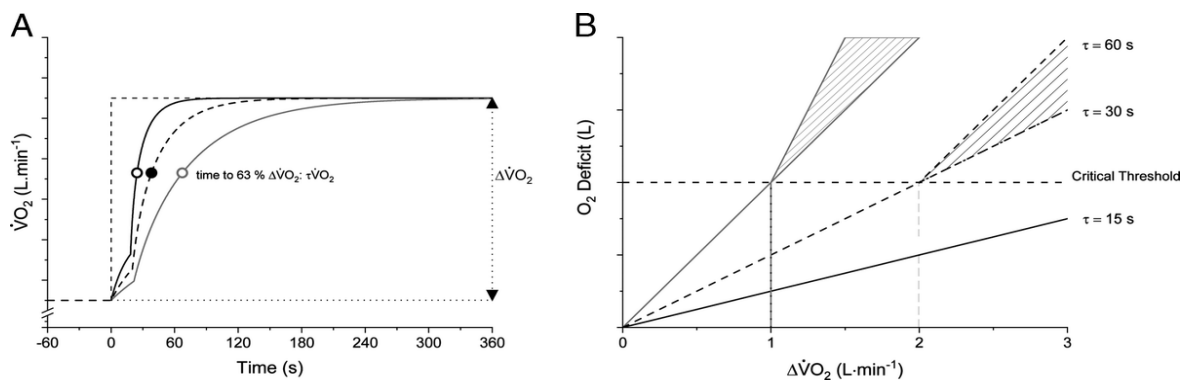
jossa T_{lim} on uupumusaika, P on suorituksen teho ja CP kriittinen teho (Poole ym. 2016). Käytännössä ennustetun ja todellisen uupumusajan välillä kuormituksessa armottomassa kuormitusalueessa on selkeä korrelaatio ($r \geq 0.87$), mutta tyypillisesti ero todellisen ja ennustetun uupumisaajan välillä on noin 15 % (Muniz-Pumares ym. 2019). Ennustuksen tarkkuuteen vaikuttaa useita tekijöitä ja monissa tutkimuksissa erot ennustetun sekä todellisen uupumisaajan välillä ovat olleet 5 % tai vähemmän (Murgatroyd ym. 2011; Chidnok ym. 2013a; Vanhatalo ym. 2016).

2.2.1 Kriittisen tehon taustalla oleva fysiologia

Kriittisen tehoon vaikuttavat aerobiset ominaisuudet. Korkealla tyypin I lihassolujakaumalla ja luurankolihasien oksidatiivisella kapasiteetilla on tyypillisesti positiivinen korrelaatio (Essen ym. 1975). Sama koskee korkeaa tyypin I lihassolujakaumaa ja $VO_{2\text{max}}$:a (Matolin ym. 1994) sekä luurankolihasien oksidatiivista kapasiteettia ja $VO_{2\text{max}}$:a (van der Zwaard ym. 2016). Myös kriittisellä teholla vaikuttaisi olevan positiivinen yhteys tyypin I lihassolujen osuuteen ja kapillaaritiheyteen sekä negatiivinen yhteys tyypin II lihassolujen osuuteen (Vanhatalo ym. 2016; Mitchell ym. 2018). Toisaalta Caen ym. (2021) eivät havainneet yhteyttä lihassolutyypin ja kriittisen tehon välillä, mutta tutkimuksen koehenkilöiden lihassolutyypin koostumuksessa oli melko pieniä eroja, mikä saattaa selittää korrelaation puutetta. Kriittiseen tehoon näyttäisi vaikuttavan myös aerobisten entsyymien aktiivisuus, mitokondrioiden tilavuus ja hapenkuljetus aktiivisille luurankolihasille (Murgatroyd ym. 2011). Kriittinen teho ei voi absoluuttisena tehona olla suuri, jos minuuttitilavuus eli hapenkuljetus aktiivisille luurankolihasille ei ole

suurta. Niinpä kriittinen teho näyttäisikin korreloivan hyvin myös $\dot{V}O_{2\max}$:n kanssa (Murgatroyd ym. 2011; Chorley ym. 2020).

Lisäksi kriittisellä teholla on vahva korrelaatio ($r = 0.95$) hapenoton primäärisen komponentin nopeuteen (Murgatroyd ym. 2011). Tämä voi selittyä yhtäläisyyksillä niihin vaikuttaviin tekijöihin, kuten luurankolihasen aerobisten entsyymien aktiivisuus ja mitokondrioiden tilavuus (Murgatroyd ym. 2011). Tai mahdollisesti hapenoton primäärisen komponentin nopeus on itsenäinen kriittiseen tehoon vaikuttava tekijä (Goulding ym. 2021). Nopeampi hapenoton primäärinen komponentti (lyhyempi aikavakio) mahdollistaa pienemmän happivajeen muodostumisen kuormituksessa tietyllä teholla (kuva 6). Hapenoton kasvaessa nopeammin kuormituksen alussa, aineenvaihdunnallinen steady state-tila eli kriittinen teho voidaan saavuttaa suuremmilla hapenotoilla tai tehoilla (Goulding ym. 2021). Kriittisen tehon ylittäminen johtaa aineenvaihduntatuotteiden kasaantumiseen, mikä vähentää luurankolihasen voimantuottoa. Tällöin tietyn työn tekeminen vaatii enemmän ATP:tä, johtaen hapenoton hitaaseen komponenttiin ja mekaanisen hyötysuhteen laskuun. Kiihtynyt ATP:n kulutus taas lisää aineenvaihduntatuotteiden muodostumista, täydentäen positiivisen takaisinkytkennän, joka johtaa lopulta uupumukseen. (Goulding ym. 2021)



KUVA 6. Hapenoton primäärisen komponentin aikavakio ja kriittinen teho (Goulding ym. 2021). Hapenoton primäärisen komponentin nopeutta tarkastellaan kuvassa 6A sen aikavakion (τ) kautta eli kuinka nopeasti hapenotto saavuttaa 63 % primäärisen komponentin amplitudista eli korkeudesta. Kuvassa 6A nopeampi hapenoton primäärinen komponentti (jyrkempi käyrä) johtaa pienempään happivajeeseen (oxygen deficit), käyrien vasemmalle puolelle jäävän pinta-alan kuvastaessa happivajetta. Kuvan 6B mukaisesti, nopeampi hapenoton primäärinen komponentti mahdollistaa hapenoton (ja tehon) kasvun suuremmaksi ennen kuin saavutetaan kriittinen teho (kuvassa 6B critical threshold, kriittinen kynnys).

VO₂max:n ja kriittisen tehon taustalla on samanlaisia tekijöitä, mutta hieman eri suhteessa. Intensiivinen kestävyysarjoittelu kasvattaa kriittistä tehoa ja VO₂max:a, mutta ne eivät kasva välttämättä samassa suhteessa (Turnes ym. 2016) ja kriittinen teho kasvaa tyypillisesti enemmän kuin VO₂max (Poole ym. 2016). Samanlaisen VO₂max:n omaavilla henkilöillä voi ollakin eroja kriittisessä tehossa (Bosquet ym. 2011).

2.2.2 *W'*:n taustalla oleva fysiologia

W' kuvastaa mekaanista työtä, jota voidaan tehdä kriittisen tehon yläpuolella (Poole ym. 2016.) Kriittisen tehon yläpuolella tehtävässä kuormituksessa *W'* vähenee ja kun kaikki saatavilla oleva *W'* on tehty, tapahtuu uupumus (Poole ym. 2016). Nimittäin kun kaikki saatavilla oleva *W'* on tehty, kriittisen tehon yläpuolella ei voida tehdä enää työtä (*W'* on nolla), mikä aiheuttaa uupumuksen kriittisen tehon yläpuolella tehtävässä kuormituksessa. Tästä syystä uupumuksen tai uupumukseen vaikuttavien tekijöiden ja *W'*:n välillä voisi olettaa olevan yhteys. Erikestoiset kuormitukset (3 ja 12 min), joissa tehdyn *W'*:n määrä on yhtä suuri, aiheuttavatkin kuormituksen jälkeisessä MVC:ssä (maksimaalinen tahdonalainen isometrinen voimantuotto) yhtä suuren laskun (Schafer ym. 2019b). De Souza ym. (2016) tutkimuksessa löydökset olivat samankaltaisia. Uupumukseen asti kriittisen tehon yläpuolella tehdyt kuormitukset johtavat samanlaiseen aineenvaihdunnalliseen tilaan aktiivisessa luurankolihasessa (fosfokreatiinin, ATP:n ja pH:n sekä laktaattipitoisuuden osalta), vaikka suoritusten kesto vaihtelisi 2–14 minuutin välillä (Black ym. 2017). Uupumus armottomassa kuormitusalueessa liittyykin alhaisiin aktiivisten lihasten fosfokreatiinitasoihin ja pH:hon (Vanhatalo ym. 2010). Niinpä *W'*:n voidaan myös ajatella kuvastavan sietokyvyn rajaa (Poole ym. 2016). Mitä suurempi *W'*, sitä suurempi sietokyvyn raja ja sitä enemmän työtä pystytään tekemään kriittisen tehon yläpuolella. Tosin yksilölliset erot esimerkiksi fosfokreatiinin pitoisuuksissa uupumuksessa voivat olla suuria (Vanhatalo ym. 2010).

W':n korrelointi aktiivisten luurankolihasen laktaatti- ja kreatiinipitoisuuksiin uupumukseen asti tehtävässä kuormituksessa viittaa siihen, että *W'*:hen vaikuttaa glykolyttinen kapasiteetti ja kyky hajottaa fosfokreatiinia (Vanhatalo ym. 2016). Kreatiinin nauttiminen lisäravinteena voi kasvattaa *W'*:tä noin 10 % (Schafer ym. 2019a) ja nopeuskestävyysarjoittelulla voidaan kasvattaa *W'*:tä (Billat 2001). Kuitenkin MAOD:lla (maximal accumulated oxygen deficit,

maksimaalinen happivaje) arvioidulla anaerobisella kapasiteetilla ja W' :llä on vain kohtalainen korrelaatio ($r = 0.654$; Muniz-Pumares ym. 2017).

W' :hen näyttäisi vaikuttavan täten anaerobiset ominaisuudet, mutta toisaalta anaerobiset ominaisuudet eivät ole ainoa tekijä, jotka vaikuttavat W' :hen. Kaikki työ kriittisen tehon yläpuolella ja $VO_2\max$:a vastaavan tehon välissä on osa W' :tä. W' :n suuruuteen vaikuttaakin myös ero kriittisen tehon ja $VO_2\max$:n välillä (Simpson ym. 2015). Niinpä kahdella henkilöllä voi olla identtinen anaerobinen kapasiteetti, mutta erilainen W' , jos kriittisen tehon ja $VO_2\max$:n välinen etäisyys ei ole näillä henkilöillä sama. Kestävyysharjoittelulla kriittinen teho voi kasvaa enemmän kuin $VO_2\max$, jolloin W' vuorostaan laskee (Poole ym. 2016). W' ei täten ole pelkästään anaerobinen ominaisuus (Poole ym. 2016).

Huippupyöräilijöillä W' korreloi polvinivelen ojentajien maksimaalisen voimantuoton kanssa (Kordi ym. 2018; Kordi ym. 2021). Voimaharjoittelu kasvattaaakin W' :tä viitaten siihen, että maksimivoima on yksi W' :tä rajoittava tekijä (Sawyer ym. 2014). Maksimivoiman kasvaessa tietyn voiman tuottaminen vaatii pienempää suhteellista voimantuottoa. Tällöin tietyn työn tekeminen onnistuu muun muassa pienemmällä aineenvaihduntatuotteiden muodostumisella, kasvattaen W' :tä.

Myös W' :n ja hapenoton hitaan komponentin välillä on havaittu positiivinen korrelaatio (Murgatroyd ym. 2011; Vanhatalo ym. 2016). Suuri W' vaatii suurta motoristen yksiköiden rekrytointia ja aineenvaihduntatuotteiden kasaantumista eli samoja tekijöitä, jotka ovat myös hapenoton hitaan komponentin taustalla. Kuormitus kriittisen tehon yläpuolella vähentääkin akuutisti W' :tä, aiheuttaa väsymystä ja hapenoton hitaan komponentin kehittymistä eli heikentää mekaanista hyötysuhdetta (Goulding ym. 2021).

Toisaalta toisin kuin kriittisellä teholla, W' :llä ei näyttäisi olevan riippuvuussuhdetta kapillaaritiheyteen tai lihassolutyypin jakaumaan (Vanhatalo ym. 2016; Mitchell ym. 2018). Tyypin II lihassolujen suuremman anaerobisen kapasiteetin takia (Schiaffino & Reggiani 2011), nämä havainnot viittaavat siihen, että W' :hen vaikuttaa muitakin tekijöitä kuin anaerobinen kapasiteetti. Kriittisen tehon ollessa tyypillisesti noin 70–80 % $VO_2\max$:sta myös tyypin I lihassoluilla saattaa olla merkittävä rooli W' :ssä. Toisaalta koska hapenoton hitaalla komponentilla ja W' :llä (Vanhatalo ym. 2016) sekä hapenoton hitaalla komponentilla ja tyypin II lihassolujakaumalla on tyypillisesti positiivinen korrelaatio (Pringle ym. 2003), on hieman

epäselvää miksi W' :llä ja lihassolutyypin jakaumalla ei ole yhteyttä. Lisäksi maksimikestävyysarjoittelu ei välttämättä kasvata W' :tä, vaan pelkästään kriittinen teho kasvaa (Vanhatalo ym. 2008; Turnes ym. 2016). Nopeuskestävyysarjoittelun on raportoitu kasvattavan W' :tä (Billat 2001), mutta sen sijaan Mitchellin ym. (2019) tutkimuksessa kestävyysurheilijoiden W' ei kasvanut nopeuskestävyysarjoittelulla, kun taas kriittinen teho kasvoi. Kaiken kaikkiaan W' :n vaikuttavat tekijät ovat tällä hetkellä epäselviä (Vanhatalo ym. 2016).

Kriittisen tehon yläpuolella kuormituksen kesto on ennustettavissa. Niinpä myös kuormituksen keston tai suorituskyvyn palautumista voidaan täten tutkia kriittinen teho -mallin avulla. Täten kriittinen teho -mallin avulla voidaan ennustaa P_{\max} ja P_{\max} :n kesto eli T_{\lim} . Samoin T_{\lim} :iin liittyviä ristiriitaisia tuloksia $VO_2\max$:n ja MAOD:in yhteydestä T_{\lim} :iin voidaan selittää kriittisen tehon ja W' :n kautta.

2.3 P_{\max} ja T_{\lim}

P_{\max} viittaa tässä tutkielmassa suoran testin maksimitehoon tai tehoon, jolla saavutettiin $VO_2\max$ suorassa testissä. T_{\lim} vuorostaan viittaa suorituksen kestoan P_{\max} :lla. Pyöräiltäessä P_{\max} :lla (T_{\lim} noin 4 min) ATP:n tuotto tapahtuu pääosin aerobisesti (74 %), mutta myös glykolyttisellä järjestelmällä (15 %) ja fosfokreatiinilla (10 %) on pieni rooli (Souza ym. 2015). Aerobisen ja glykolyttisen järjestelmän osuudet ovat samankaltaiset myös suoran testin viimeisissä kuormissa (Bertuzzi ym. 2013; Damasceno ym. 2015).

Vaihteluväli T_{\lim} :ssä eri koehenkilöiden välillä voi olla suurta, reilusta kahdesta minuutista aina 10 minuuttiin asti (Faina ym. 1997). Suuret erot T_{\lim} :ssä selittyvät osittain koehenkilöiden fysiologisilla ominaisuuksilla, mutta myös P_{\max} :n määrittystavalla ja suoran testin protokollalla. Joissain tutkimuksissa P_{\max} määritellään tehona, jossa saavutetaan suorassa testissä $VO_2\max$ (Billat ym. 1996; Caputo & Denadai 2006; Moral-Gonzalez ym. 2020) ja joissain suoran testin maksimitehona (Souza ym. 2015; Thomas ym. 2016; Karsten ym. 2018). Samanlaisen $VO_2\max$:n omaavilla henkilöillä voi olla erilainen suoran testin maksimiteho (Souza ym. 2015). Samoin $VO_2\max$:a vastaava teho ja suoran testin maksimiteho eivät välttämättä tapahdu samalla teholla, jälkimmäisen ollessa mahdollisesti korkeampi. Suoran testin lopussa hapenotto ei välttämättä enää kasva ($VO_2\max$ saavutettu), mutta suora testi itsessään voi jatkua (Hebisz

ym. 2018), johtaen suurempaan suoran testin maksimitehoon kuin mitä teho oli hapenoton saavuttaessa maksimin.

Myös $VO_2\text{max}$:n määrittämisessä on ollut eroja tutkimusten välillä. Esimerkiksi Jones ym. (2003) määrittivät P_{max} :n tehona, jolloin hapenoton 30 sekunnin keskiarvo oli korkeimmillaan. Sen sijaan muun muassa Caputon ja Denadain (2006) tutkimuksessa P_{max} -testi tehtiin teholla, jolloin suorassa testissä kaksi kolmesta kriteeristä (hengitysosamäärä > 1.1 , veren laktaattipitoisuus > 8 mmol/l ja syke 90 % iän mukaan ennustetusta maksimista) $VO_2\text{max}$:n määrittämiselle oli saavutettu. Tämänkaltaisella kriteereillä hapenotto ei välttämättä ole saavuttanut maksimia (Poole ym. 2008), jolloin P_{max} voi jäädä alhaisemmaksi kuin todellisella $VO_2\text{max}$:lla tai suoran testin maksimiteholla.

P_{max} :n määrittäminen vaikuttaa olennaisesti T_{lim} :iin, sillä mitä korkeampi P_{max} , sitä lyhempi T_{lim} . Taulukkoon 1 on listattu tutkimuksia, joissa P_{max} -testi on tehty pyöräillen ja T_{lim} on raportoitu. Pidemmässä (12 ja 16 min) suorissa testeissä hapenotto ja P_{max} voivat jäädä alhaisemmaksi kuin lyhyissä (8 min) suorissa testeissä (Yoon ym. 2007; Jamnick ym. 2018). Yoonin ym. (2007) tutkimuksessa hapenotto jäi lähes 10 % matalammaksi 16 min testissä kuin 8 min testissä. Kuitenkin tyypillisesti maksimaalinen hapenotto on erilaisissa suorissa testeissä samanlainen (kestosta tai korotuksista riippumatta), mutta vaikka hapenotto ei eroaisi erilaisissa suorissa testeissä, P_{max} on korkeampi lyhyissä testeissä (Bishop ym. 1998; Bentley & McNauhton 2003; Adami ym. 2013). Lisäksi suorissa testeissä, joissa kuorma nousee hitaammin (pidempi kesto), koehenkilöillä voi olla vielä uupumuksessa suurempi tehontuottoreservi kuin uupumuksessa suorissa testeissä, joissa kuorma nousee nopeammin (Davies ym. 2021).

Taulukkoon 1 listatuista tutkimuksista voidaan havaita, että T_{lim} on tyypillisesti 3–6 minuuttia. Taulukon 1 tutkimuksista, joissa T_{lim} oli lyhyt, kuormien nostot tai tehon kasvu oli suurta suorassa testissä. Esimerkiksi Billatin ym. (2013) tutkimuksessa kuormien nostot olivat 50 wattia 3 minuutin välein, johtaen korkeaan P_{max} :iin ja täten lyhyeen T_{lim} :iin. Pallaresin ym. (2020) tutkimuksessa teho kasvoi 25 wattia per minuutti, Thomasin ym. (2016) tutkimuksessa 30 wattia per minuutti.

Sen sijaan taulukon 1 tutkimuksista, joissa T_{lim} oli pisin, Felipe ym. (2020) määrittivät P_{max} :n $VO_2\text{max}$:n tehona ja lisäksi kuormien nostot olivat pieniä (30 wattia 3 minuutin välein), Raimundon ym. (2019) tutkimuksessa vuorostaan 35 wattia 3 minuutin välein. Nämä johtavat

alhaiseen P_{\max} :iin ja täten pitkään T_{\lim} :iin. Varsinkin $VO_2\max$:a vastaavana tehona määritellyssä P_{\max} :ssa, suorassa testissä saattaa olla vielä reserviä W' :ssa eli kyseisellä teholla suorassa testissä ei ollut vielä tapahtunut uupumusta. Tämä reservi sen sijaan voidaan hyödyntää P_{\max} -testissä, jossa tehdään suoritus uupumukseen saakka P_{\max} :lla.

TAULUKKO 1. T_{\lim} eli uupumusaika P_{\max} -testissä eli suoran testin maksimiteholla tai suoran testin $VO_2\max$:a vastaavalla teholla pyöräillen eri tutkimuksissa.

Tutkimus	koehenkilöt	$VO_2\max$ (ml/kg/min)	T_{\lim} (min:s)
Billat ym. (1996)	pyöräilijät	72	3:42 (+- 1:31)
Billat ym. (2013)	fys. akt.	53	2:16 (+- 1:21)
Bosquet ym. (2011)	pyöräilijät	55	5:06 (+- 0:53)
Caputo ym. (2003)	pyöräilijät	67	6:24 (+- 1:06)
Caputo ym. (2003)	harjoittelemattomat	36	5:11 (+- 1:45)
Caputo & Denadai (2006)	triathlonistit	61	6:30 (+- 1:54)
Coakley & Passfield (2018)	pyöräilijät	60	2:45 (+- 1:38)
Faina ym. (1997)	pyöräilijät	72	3:45 (+- 1:34)
Felippe ym. (2020)	fys. akt.	38	6:33 (+- 1:59)
Heubert ym. (2005)	pyöräilijät ja triathlonistit	59	4:14 (+- 0:50)
Hill ym. (2002)	fys. akt.	39	6:11 (+- 1:05)
Karsten ym. (2017)	fys. akt.	50	4:11 (+- 1:20)
Karsten ym. (2015)	fys. akt.	51	4:16 (+- 1:45)
Karsten ym. (2018)	fys. akt.	54	4:33 (+- 1:12)
Laursen ym. (2003)	pyöräilijät	64	3:57 (+- 0:57)
Lepretre ym. (2004)	triatlonistit	62	5:12 (+- 2:25)
Moral-Gonzalez ym. (2020)	fys. akt.	50	4:13 (+- 0:58)
Miyagi ym. (2017)	fys. akt.	43	5:12 (+- 1:00)
Pallares ym. (2020)	pyöräilijät, triathlonistit	58	3:23 (+- 0:39)
Possamai ym. (2020)	fys. akt.	49	5:10 (+- 0:36)
Raimundo ym. (2019)	pyöräilijät	61	6:41 (+- 1:46)
Ronnestad (2014)	pyöräilijät	67	6:12 (+- 1:20)
Sousa ym. (2018)	pyöräilijät	65	3:28 (+- 0:35)
Sousa ym. (2015b)	pyöräilijät	60	3:20 (+- 0:24)
Thomas ym. (2016)	pyöräilijät	59	3:08 (+- 0:35)
Wilkerson ym. (2004)	fys. akt.	50	3:06 (+- 0:15)
Keskiarvo			4:36 (+-1:12)

Fys. akt., fyysisesti aktiiviset.

T_{lim} :n ja VO_2max :n välillä on raportoitu positiivinen yhteys (Laursen ym. 2003; Sousa ym. 2015), negatiivinen yhteys (Billat ym. 1994b; Billat ym. 1996; Faina ym. 1997) ja ei minkäänlaista yhteyttä (Blondel ym. 2001; Caputo & Denadai 2006; Billat ym. 2013). MAOD:n perusteella arvioidun anaerobisen kapasiteetin vuorostaan on raportoitu olevan positiivisesti yhteydessä T_{lim} :iin (Faina ym. 1997; Renoux ym. 1999) tai ei minkäänlaisessa yhteydessä (Caputo ym. 2003; Midgley ym. 2007). Selitys näihin ristiriitaisiin tuloksiin löytyy muun muassa eroista P_{max} :n määrittämisessä ja suoran testin protokollassa.

VO_2max ei ole ainoa tekijä, joka vaikuttaa suoran testin maksimitehoon, vaan siihen vaikuttavat myös tehontuottokyky, anaerobinen kapasiteetti ja taloudellisuus (Jones & Carter 2000). Suoran testin maksimitehoa voidaan selittää myös kriittinen teho -mallin kautta. Kriittisen tehon ja suoran testin maksimitehon välillä onkin havaittu voimakkaampi korrelaatio kuin VO_2max :n ja suoran testin maksimitehon (Souza ym. 2015).

Korkea kriittinen teho mahdollistaa suuren suoran testin maksimitehon muun muassa nopean hapenoton primäärisen komponentin kautta, jolloin kuorman kasvaessa steady-state tila saavutetaan nopeammin ja täten happivaje jää pienemmäksi kuorman kasvaessa. Tämä mahdollistaa korkeamman maksimitehon saavuttamisen. W' :llä on myös oma roolinsa ja sen merkitys korostuu suoran testin viimeisillä kuormilla. Suoran testin maksimiteho voidaan ennustaa prosentin tarkkuudella kriittisen tehon ja W' :n avulla (Souza ym. 2015) ja sama koskee T_{lim} :iä (Pallares ym. 2020).

Kuten aiemmin mainittu, joissain tutkimuksissa on havaittu negatiivinen yhteys VO_2max :n ja T_{lim} :n välillä. Tämä yhteys havaittiin esimerkiksi Billatin ym. (1994b) ja Fainan ym. (1997) tutkimuksissa, joissa P_{max} määriteltiin VO_2max :a vastaavana tehona. Koehenkilöillä, joilla oli korkea VO_2max , saattoi olla suuri etäisyys kriittisen tehon ja VO_2max :n välillä. Kriittisen tehon ja VO_2max :n välillä on yleensä vahva korrelaatio (Murgatroyd ym. 2011; Chorley ym. 2020), mutta esimerkiksi kestävyysurheilijoilla samanlaisen VO_2max :n omaavilla kestävyysurheilijoilla voi olla suuriakin eroja kriittisessä tehossa (Bosquet ym. 2011). Samanlaisen kriittisen tehon, mutta erilaisen VO_2max :n tapauksessa, korkeamman VO_2max :n henkilöt tarvitsevat enemmän W' :a pelkästään saavuttaakseen VO_2max :n. Niinpä P_{max} -testissä jokainen polkaisu vaatisi myös enemmän W' :a henkilöillä, joilla on korkea VO_2max , sillä he suorittavat testin korkeammalla teholla suhteessa heidän kriittiseen tehoonsa. Tämä vuorostaan johtaisi lyhyempään T_{lim} :iin, jos P_{max} on määritetty VO_2max :ia vastaavana tehona.

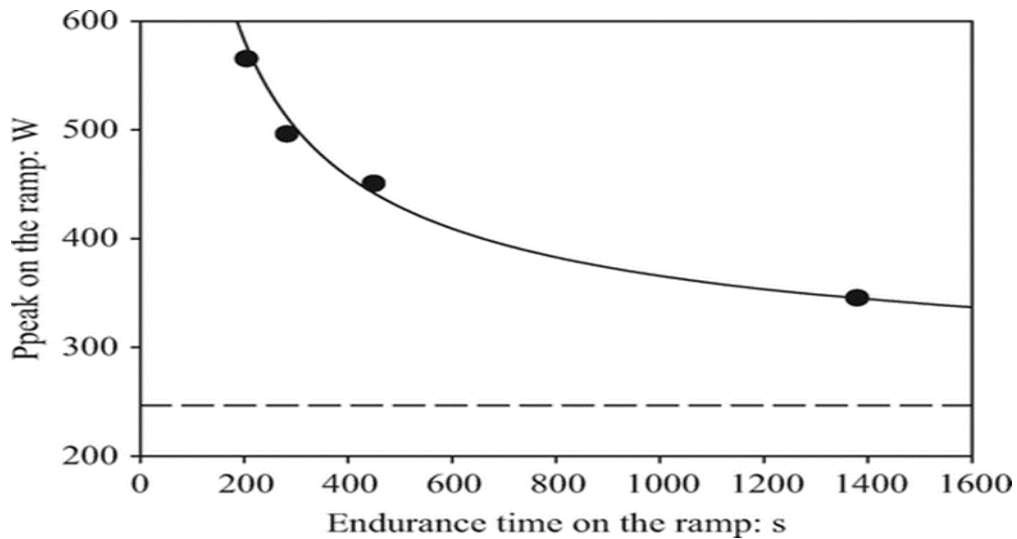
Samalla periaatteella on myös perusteltavissa joissain tutkimuksissa raportoitu positiivisen korrelaation puute T_{lim} :n ja MAOD:n perusteella arvioidulla anaerobisella kapasiteetilla. Henkilöllä voi olla korkea anaerobinen kapasiteetti, mutta VO_{2max} :a vastaavana tehona määritetyn P_{max} :n saavuttaminen vaatii jo merkittävää anaerobista aineenvaihduntaa. Näin T_{lim} ei välttämättä ole pidempi kuin henkilöllä, jolla on matalampi anaerobinen kapasiteetti, jos P_{max} :n saavuttaminen ei vaadi yhtä suurta anaerobista aineenvaihduntaa matalamman anaerobisen kapasiteetin henkilöllä.

Tosin Billatin ym. (1994b) ja Fainan ym. (1997) tutkimuksissa ei mitattu kriittistä tehoa tai W' :tä ja sama koskee monia muita T_{lim} :iä tarkastelleita tutkimuksia. Toisaalta kriittisen tehon merkityksestä T_{lim} :ssä (jossa P_{max} on määritetty VO_{2max} :ia vastaavana tehona) on epäsuoraa näyttöä. Billatin ym. (1994b) tutkimuksessa anaerobinen kynnys korreloi positiivisesti T_{lim} :iin ja Billatin ym. (1994a) löydökset olivat samankaltaisia. Lisäksi anaerobisen kynnyksen kasvu harjoittelun myötä oli vahvasti yhteydessä pidempään T_{lim} :iin tutkimuksessa, jossa P_{max} määriteltiin VO_{2max} :n tehona (Demarle ym. 2003). Midgley'n ym. (2007) tutkimuksessa pienempi ero anaerobisen kynnyksen ja VO_{2max} :n välillä korreloi pidemmän T_{lim} :n kanssa, mutta MAOD:lla ei ollut korrelaatiota T_{lim} :iin. Kriittinen teho vuorostaan korreloi vahvasti erilaisten laktaattien ja ventilaation perustuvien kynnyksen kanssa (Galan-Rioja ym. 2020).

Positiivinen korrelaatio T_{lim} :n ja VO_{2max} :n välillä voidaan vuorostaan teoriassa havaita, jos henkilöllä, joilla on korkea VO_{2max} on myös korkea kriittinen teho suhteessa VO_{2max} :iin ja P_{max} on määritelty VO_{2max} :n tehona. Samoin tämä positiivinen korrelaatio voidaan havaita, jos korkean VO_{2max} :n ja W' :n välillä on positiivinen korrelaatio. Sen sijaan, mikäli P_{max} määritellään suoran testin maksimitehona, kriittisen tehon ei pitäisi vaikuttaa merkittävästi T_{lim} :iin. Korkeampi kriittinen teho mahdollistaisi vain korkeamman P_{max} :n.

Maksimitehona määritetyssä P_{max} :ssa, W' :n merkitys T_{lim} :ssä korostuu. Tämä on perusteltavissa fysiologisesti ja matemaattisesti. Koska W' vähenee akuutisti kriittisen tehon yläpuolella, suoran testin kuormat, joissa kriittinen teho ylitetään aiheuttavat W' :n vähenemistä ja väsymystä. Suuri W' mahdollistaa usean kuorman tekemisen kriittisen tehon yläpuolella, mutta samalla suoran testin kesto kasvaa. Suoran testin keston kasvu taas johtaa alhaisempaan P_{max} :iin (Morton 2011; Adami ym. 2013), kuten kuvassa 7 näkyy. Alhaisempi P_{max} johtaisi taas pidempään T_{lim} :iin. Kuva 7 perustuu suoran testin keston merkitykseen P_{max} :iin yhdellä

henkilöllä (kriittinen teho ja W' ovat tietyn suuruiset), mutta sama periaate pätee myös henkilöiden välillä, jolloin esimerkiksi W' :ssä on eroja henkilöiden välillä.



KUVA 7. Suoran testin keston ja P_{\max} :n yhteys (Morton 2011). Suurempi tai nopeampi nousu suoran testin kuormassa mahdollistaa suuremman P_{\max} :n saavuttamisen. Katkoviiva viittaa kriittiseen tehoon ja mustat pallot W' :hen sekä samalla P_{\max} :iin.

Matemaattinen peruste on seuraavanlainen. Oletetaan että kahdella henkilöllä on yhtä suuri kriittinen teho (200 wattia), mutta henkilöllä A W' on 9 kilojoulea (kJ) ja henkilöllä B vuorostaan 3 kJ. Suoran testin protokolla on seuraavanlainen: aloitus 75 wattia, 25 watin korotuksin 2 minuutin välein. Kummankaan koehenkilön W' ei vähene 200 wattiin asti. Sen sijaan seuraavassa kuormassa (225 wattia) W' vähenee ja tämä W' :n määrä voidaan laskea, koska työ on tehon ja ajan tulo.

$$25 \text{ wattia} * 120 \text{ sekuntia} = 3000 \text{ J eli } 3 \text{ kJ}$$

jossa 25 wattia on teho kriittisen tehon yläpuolella. Täten koehenkilö B:llä ei ole enää W' :tä jäljellä, mutta koehenkilöllä A riittää W' :tä tehdä vielä seuraava kuorma loppuun (250 wattia, 50 wattia kriittisen tehon yläpuolella)

$$50 \text{ wattia} * 120 \text{ sekuntia} = 6000 \text{ J eli } 6 \text{ kJ}$$

Tämän kuorman päättyessä koehenkilö A:n W' on nolla, kun W' eli työmäärä kriittisen tehon yläpuolella 225 ja 250 watin kuormissa lasketaan yhteen ($9 \text{ kJ} - 3 \text{ kJ} - 6 \text{ kJ} = 0$). Koska W' ja

teho ovat molempien koehenkilöiden tapauksessa tiedossa, T_{lim} voidaan laskea. Koehenkilö A polkee 250 wattilla (50 wattia yli kriittisen tehon) ja koehenkilö B 225 wattilla (25 wattia yli kriittisen tehon), uupumukseen saakka eli, kunnes W' on nolla.

Koehenkilö A: $9000 \text{ J} / 50 \text{ wattia} = 180 \text{ sekuntia}$

Koehenkilö B: $3000 \text{ J} / 25 \text{ wattia} = 120 \text{ sekuntia}$

Näin korkean W' :n omaavalla henkilöllä on pidempi T_{lim} , mikä on perusteltavissa protokollalla (kuormien nousut kaikille samat), P_{max} :n määrittelyllä (suoran testin maksimiteho) ja kriittinen teho -mallilla. Kriittisen tehon ei pitäisi vaikuttaa merkittävästi T_{lim} :iin, sillä kriittisen tehon muuttaminen ei vaikuta yllä oleviin laskuihin. Yllä oleva malli on tosin yksinkertaistettu. Esimerkiksi suorassa testissä W' on pienempi kuin tasatehoisessa kuormituksessa.

Tästä mallista on kuitenkin käytännön näyttöä Kachourin ym. (1996) tutkimuksessa, jossa P_{max} tehtiin juosten ja määritettiin nopeuden avulla. Juoksussa W' :n sijasta käytetään D' :tä, jonka yksikkö on matka. D' oli positiivisesti yhteydessä T_{lim} :iin ja kriittisellä nopeudella ei ollut tilastollisesti merkitsevää yhteyttä T_{lim} :iin (Kachouri ym. 1996). Hapenottoa ei Kachourin ym. (1996) tutkimuksessa mitattu, joten VO_2max :n korrelaatiosta T_{lim} :iin ei voida tehdä päätelmiä.

Heterogeenisessä ryhmässä (sisältäen harjoittelemattomia ja harjoitelleita tai terveitä nuoria, vanhuksia ja sairaita) W' :n ja VO_2max :n välillä on positiivinen korrelaatio (Poole ym. 2016). Sen sijaan homogeenisemmässä ryhmässä (esim. terveillä nuorilla) W' :n ja VO_2max :n välillä ei ole yhteyttä (Murgatroyd ym. 2011; Chorley ym. 2020). Tästä voidaan rakentaa hypoteesi, että VO_2max :illa ei ole korrelaatiota T_{lim} :iin homogeenisessä ryhmässä, jos P_{max} -testit tehdään suoran testin maksimiteholla. Tämä hypoteesi sisältää kuitenkin muutamia oletuksia. T_{lim} :iä ja kriittinen teho -mallia on tutkittu pääasiassa fyysisesti aktiivisilla tai kestävyyslajien urheilijoilla, mutta ei niinkään teholajien urheilijoilla tai kamppailulajien urheilijoilla. Anaerobiset ominaisuudet ovat tärkeässä roolissa menestyksekkäillä kamppailulajien urheilijoilla (James ym. 2016), mikä todennäköisesti näkyy myös kamppailulajien urheilijoiden harjoittelussa. Tästä syystä W' :n ja VO_2max :n yhteys kamppailulajien urheilijoilla voi olla erilainen kuin harjoittelemattomilla tai kestävyysurheilijoilla, mutta toisaalta tästä ei tällä hetkellä vaikuta olevan näyttöä.

3 VÄSYMYS, PALAUTUMINEN JA VO₂MAX

Väsymys määritellään tässä työssä voiman- tai tehontuoton laskuna. Uupumus vuorostaan kykenemättömyytenä säilyttää suorituksen jatkumiseen vaadittavaa voiman- tai tehontuottoa. Palautumisella tarkoitetaan suorituskyvyn tai voiman – ja tehontuoton paluuta väsymystä aiheuttavan kuormituksen edeltävälle tasolle. Tässä luvussa käydään ensin läpi väsymykseen vaikuttavia tekijöitä ja miten ne voivat olla kuormituksesta riippuvaisia. Kuormituksen aiheuttama väsymys voi vuorostaan vaikuttaa kuormituksen jälkeiseen palautumiseen, jota käsitellään myös tässä luvussa. Palautumiseen vaikuttaa useita tekijöitä ja VO₂max:lla näyttäisi olevan positiivinen yhteys moniin palautumiseen vaikuttaviin tekijöihin, mutta ei kaikkiin.

3.1 Väsymys

Perifeerinen väsymys viittaa siihen, että luurankolihas (sisäinen kyky) tuottaa voimaa laskee, sentraalinen väsymys vuorostaan kuvastaa luurankolihasaktivaation laskua (Carroll ym. 2017). Perifeeristä väsymystä aiheuttavia tekijöitä ovat muun muassa aineenvaihduntatuotteet kuten protonit ja epäorgaaninen fosfaatti (Sundberg ym. 2018) ja energiavarojen kuten glykogeenin riittävyys (Ortenblad ym. 2013) sekä erityisesti häiriöt kalsiumin vapautumisesta SR:stä eli sarkoplasmisesta retikulumista (Cheng ym. 2018). Esimerkiksi ATP:n pitoisuuden lasku, muutokset ionitasapainossa ja epäorgaanisen fosfaatin pitoisuuden kasvu solun sisällä häiritsevät kalsiumin vapautumisessa SR:stä, johtaen lihaksen voimantuoton laskuun. Väsymystä aiheuttavia tekijöitä on useita erilaisia ja erityyppisissä kuormituksissa väsymysmekanismit voivat olla erilaiset. (Cheng ym. 2018)

Sentraalinen väsymys kuormituksessa voi liittyä motivaatioon ja muutoksiin aivojen välittäjäaineissa kuten serotoniinissa sekä dopamiinissa (McMorris ym. 2018). Lisäksi III ja IV afferentit voivat aiheuttaa sentraalista väsymystä raskaassa kuormituksessa (Sidhu ym. 2017). Täten sentraalinen ja perifeerinen väsymys voivat olla kytkettyneitä, koska III ja IV afferentit välittävät tietoa aktiivisten lihasten aineenvaihdunnallisesta tilasta keskushermostolle (Amann 2011). Tämä inhiboiva palaute voi vuorostaan vähentää motoristen yksiköiden aktivointia keskushermostossa, aiheuttaen sentraalista väsymystä (Amann 2011).

Perifeeristen ja sentraalisten väsymystekijöiden merkitys vaihtelee eri kestoisissa kuormituksissa. Lyhyessä uupumukseen asti tehdyssä kuormituksessa perifeerinen väsymys on suurempaa kuin pitkäkestoisessa kuormituksessa (Thomas ym. 2016; Schafer ym. 2019b). Sen sijaan sentraalinen väsymys on suurempaa pidempikestoisessa kuin lyhytkestoisessa kuormituksessa (Thomas ym. 2016). Täten kuormituksen kesto ja intensiteetti näyttäisivät vaikuttavan kuormituksen aiheuttamaan perifeeriseen ja sentraaliseen väsymykseen. Kuitenkin esimerkiksi Thomasin ym. (2016) tutkimuksissa MVC:n lasku oli samankaltainen erikestoisissa kuormituksissa (3, 11 ja 42 min).

Vaikka perifeeriset väsymystekijät näyttäisivät olevan suuremmassa roolissa lyhytkestoisessa kuormituksessa (esim. P_{\max} -testissä) kuin pidempikestoisessa, myös sentraalisilla väsymystekijöillä on spekuloitu olevan suuri merkitys lyhyemmissä intensiivisissä kuormituksissa. Erikestoisissa kuormituksissa armottomalla kuormitusalueella esimerkiksi perifeerinen väsymys (Burnley ym. 2012) ja aktiivisen lihaksen fosfokreatiinitasot sekä pH voivat olla uupumuksessa samankaltaiset (Black ym. 2017). Tähän liittyen on muodostettu kriittisen perifeerisen väsymyskynnyksen hypoteesi, jonka mukaan III ja IV afferentit aiheuttavat sentraalista väsymystä rajoittamalla luurankolihasien käskytystä, kun kuormituksessa saavutetaan tietty kriittinen aineenvaihduntatuotteiden raja (Hureau ym. 2016). W' :n ollessa hyvin samankaltainen erikestoisissa kuormituksissa armottomassa kuormitusalueessa, W' :n suuruus ja kriittinen väsymyskynnys liittyisivät toisiinsa III ja IV afferentien kautta (Hureau ym. 2016; Goulding ym. 2021). Hypoteesi ei kuitenkaan ole täysin aukoton. Esimerkiksi erikestoisissa armottoman kuormitusalueen kuormituksissa perifeerinen väsymys ei välttämättä ole yhtä suurta (Thomas ym. 2016). Lisäksi vaikka uupumukseen asti kriittisen tehon yläpuolella tehdyssä kuormituksessa perifeerinen väsymys on keskimäärin samanlainen eri koehenkilöillä, yksilölliset erot voivat olla suuria (Neyroud ym. 2016).

Suorassa testissä uupumusta saattaa aiheuttaa enemmän sentraaliset kuin perifeeriset väsymystekijät (Torres-Peralta ym. 2016). Suoran testin ja uupumukseen asti kriittisen tehon yläpuolella tehtävän tasavauhtisen kuormituksen jälkeen vähän harjoitelleilla henkilöillä löytyy tehoreservi (Swisher ym. 2019). Swisherin ym. (2019) tutkimuksessa välittömästi suoran testin päättymisen jälkeen polkupyöräergometri vaihdettiin isokineettiselle vaihteelle (polkimet pyörivät vakionopeudella) ja koehenkilöt suorittivat maksimaalisen sprintin 5 sekunnin ajan. Koehenkilöt kykenivät suurempaan tehontuottoon isokineettisessä sprintissä kuin suoran testin lopussa eli koehenkilöillä oli tehoreservi vielä uupumuksessa (Swisher ym. 2019).

Uupumuksen aiheuttivat todennäköisesti sentraaliset tekijät, jotka saattoivat liittyä motivaatioon ja rasiituksen tuntemukseen (Swisher ym. 2019). Sen sijaan kestävyysurheilijoilla suoran testin uupumuksen jälkeen ei havaita tehoreserviä (Ferguson ym. 2016). Kestävyysharjoittelu vähentääkin sentraalista väsymystä kuormituksessa, parantaen perifeerisen väsymyksen sietokykyä (Zghal ym. 2015), varsinkin jos kestävyysharjoittelu tehdään samankaltaisella intensiteetillä kuin kuormitus, jossa sentraalista väsymystä testataan (O’Leary ym. 2017).

Myös lihassolujakaumalla voi olla merkitys kuormituksen aiheuttamassa väsymyksessä. Tyypin I lihassoluilla on parempi väsymyksensietokyky ja oksidatiivinen kapasiteetti, tyypin II lihassoluilla vuorostaan parempi tehontuottokyky (Schiaffino & Reggiani 2011). Esimerkiksi epäorgaaninen fosfaatti heikentää voimantuottoa enemmän tyypin II lihassoluissa kuin tyypin I lihassoluissa (Linari ym. 2010). Suuren tyypin II lihassolujen osuuden omaavilla henkilöillä MVC laskee intensiivisen kuormituksen jälkeen enemmän kuin suuren tyypin I lihassolujen osuuden omaavilla henkilöillä (Hamada ym. 2003). Lievensin ym. (2020) tutkimuksessa suuri tyypin II lihassolujen osuus oli yhteydessä 20 % suurempaan väsymysindeksiin eli tehontuoton laskuun Wingatessa ja suurempaan pH:n laskuun verrattuna henkilöihin, joilla oli suuri tyypin I lihassolujen osuus.

Coelhon ym. (2015) ja Fergusonin ym. (2016) mukaan korkeampi VO_2max korreloi pienemmän tehontuottokyvyn laskun kanssa välittömästi suoran testin jälkeen suhteessa lepotason tehontuottokykyyn. Toisin sanoen, korkeampi VO_2max suojasi väsymyksen aiheuttamalta tehontuoton laskulta (Ferguson ym. 2016). Myös pienemmän voimantuoton laskun intensiivisessä kuormituksessa ja VO_2max :n välillä on havaittu korrelaatio (Li ym. 2002). Huippupyöräilijöillä (VO_2max 75 ml/kg/min) MVC:n on havaittu laskevan vähemmän kuin hyvin harjoitelleilla pyöräilijöillä (VO_2max 53 ml/kg/min) välittömästi minuutin ja 10 minuutin kestoisten aika-ajojen jälkeen (Ducrocq ym. 2021). Lisäksi kriittisellä teholla on havaittu käänteinen yhteys intensiivisen kuormituksen jälkeiseen väsymykseen (de Souza ym. 2016). Pitkäkestoisessa armottoman kuormitusalueen kuormituksessa (12 minuuttia) uupumukseen saakka, MVC:n lasku oli pienempää henkilöillä, joilla oli korkea VO_2max (Schafer ym. 2019b). Sen sijaan 3 minuutin kestoisessa kuormituksessa MVC:n laskulla ei ollut yhteyttä VO_2max :iin (Schafer ym. 2019b). Vernillon ym. (2019) tutkimuksen tulokset olivat samankaltaisia. Perifeerinen väsymys sen sijaan voi olla suurempaa koehenkilöillä, joilla on

suurempi W' 3 minuutin kuormituksessa, mutta ei 12 minuutin kuormituksessa (Schafer ym. 2019b).

W' ei välttämättä ole suoraan linkittynyt irtiottokykyyn, eli väsymyksen suuruuteen uupumuksessa. Esimerkiksi Skiba ym. (2015) eivät havainneet yhteyttä W' :n suuruuden ja pH:n laskun välillä. Kreatiinilisäravinteella voidaan kasvattaa W' :tä, mutta väsymys uupumuksessa ei välttämättä ole sen suurempaa kuin ennen kreatiinilisäravinteen nauttimista (Schafer ym. 2019a), eli irtiottokyky oli samanlainen.

Lopuksi todettakoon väsymyksen olevan suorituksesta riippuvainen, jonka takia suorassa testissä ja P_{\max} -testissä väsymysmekanismit voivat olla hieman erilaiset. Kuormituksen keston kasvaessa myös sentraalinen väsymys kasvaa, joten sentraalisen väsymyksen merkitys on suurempi suorassa testissä, kuin P_{\max} -testeissä. Pitkissä suorissa testeissä sentraalinen väsymys saattaa rajoittaa P_{\max} :a. Matalampi P_{\max} näkyisi vuorostaan pidempänä T_{\lim} :nä. Lisäksi $VO_{2\max}$ voi korreloida negatiivisesti kuormituksen jälkeiseen väsymykseen kanssa. Kestävyysharjoittelu kasvattaa $VO_{2\max}$:a ja parantaa väsymyksen sietokykyä. Korkean tyypin I lihassolujen osuuden ja $VO_{2\max}$:n omaavilla henkilöillä väsymys kuormituksen jälkeen saattaa olla pienempää kuin matalan tyypin I lihassolujen osuuden tai $VO_{2\max}$:n omaavilla henkilöillä. Kuormituksen jälkeinen väsymys voi vuorostaan vaikuttaa palautumiseen. Yhteyttä $VO_{2\max}$:in ja kuormituksen jälkeiseen väsymykseen ei kuitenkaan ole havaittu kaikissa tutkimuksissa.

3.2 Palautuminen

Palautumiseen vaikuttavat sentraalisen ja perifeerisen väsymyksen väistyminen. Sentraalisen väsymyksen vaikutukset kestävät pidempään pitkäkestoisten kuormitusten jälkeen kuin lyhytkestoisten (Carroll ym. 2017). Sentraalinen väsymys on väistynyt jo parissa minuutissa 6 minuutin kestoisen armottoman kuormitusalueen kuormituksen jälkeen, mutta perifeerinen väsymys vain osittain, hieman alle tai yli puolet, riippuen analysointimenetelmästä (Felippe ym. 2020). Toisaalta suorituskyvyn palautuminen ei korreloinut perifeerisen väsymyksen markkerien tai sentraalisen väsymyksen markkerien muutosten kanssa (Felippe ym. 2020). Suorituskyvyn palautuminen saattaa sen sijaan liittyä vuorovaikutukseen perifeerisen ja

sentraalisen väsymyksen välillä, jota vuorostaan kuvastaa MVC:n palautuminen. MVC:n ja kestävyysuorituskyvyn palautumisella olikin selkeä korrelaatio ($r = 0.73$). (Felippe ym. 2020)

Tässä luvussa tarkastellaan ensiksi fysiologisia tekijöitä, joiden kautta $VO_2\max$ voisi olla yhteydessä nopeampaan palautumiseen. Tämän jälkeen tarkastellaan palautumista pääasiassa armottoman kuormitusalueen kuormituksista ja miten näissä kuormituksissa $VO_2\max$ on ollut yhteydessä palautumiseen.

3.2.1 $VO_2\max$ ja palautuminen

Korkealla $VO_2\max$:lla on havaittu yhteys nopeampaan palautumiseen intervallikuormituksissa, joissa on lyhyet palautusjaksot (Tomlin & Wenger 2001). Merkittävin $VO_2\max$:a selittävä tekijä on minuuttitilavuus eli kuinka paljon verta pystytään kuljettamaan aktiivisille luurankolihaksille (Joyner & Dominelli 2021). Suurempi minuuttitilavuus auttaa paitsi hapen, myös ravinteiden kuljetuksessa lihaksille ja myös aineenvaihduntatuotteiden sekä lämmön poistossa lihaksista (Tomlin & Wenger 2001).

Samoin fosfokreatiinin uudelleensynteesi kuormituksen jälkeen on hapesta riippuvainen (Haseler ym. 1999). Fosfokreatiininvarastojen täytyminen kuormituksen jälkeen tapahtuu nopeammin kestävyysurheilijoilla kuin ei-kestävyysurheilijoilla (Layec ym. 2016; Moll ym. 2018). Fosfokreatiininvarastojen täytyminen kuormituksen jälkeen myös nopeutuu kestävyysharjoittelulla (Forbes ym. 2008). Tehokkaampi fosfokreatiininvarastojen täytyminen liittyy muun muassa mitokondrioiden tilavuuden kasvuun (Layec ym. 2016). Fosfokreatiinitasojen palautuminen kuormituksen jälkeen onkin riippuvainen luurankolihasien oksidatiivisesta kapasiteetista (Heskamp ym. 2021). Niinpä tyypin I lihassoluissa fosfokreatiinitasojen palautuminen tapahtuu aluksi nopeammin kuin tyypin II lihassoluissa (Soderlund & Hultman 1991). $VO_2\max$:lla ja luurankolihasien oksidatiivisella kapasiteetilla on tyypillisesti positiivinen korrelaatio (Guzman ym. 2020; Zuccarelli ym. 2020).

Lisäksi anaerobiset ominaisuudet tai irtiottokyky voivat vaikuttaa epäsuorasti palautumiseen. Happamuus voi inhiboida oksidatiivista fosforylaatiota (Jubrias ym. 2003) ja täten hidastaa fosfokreatiinin uudelleensynteesiä raskaan kuormituksen jälkeen (Layec ym. 2013). Niinpä suuren tyypin II lihassolujakauman omaavilla henkilöillä palautuminen voi olla hitaampaa

johtuen eroista irtiottokyvyssä, eikä $VO_2\text{max}$:sta. Korkeampi $VO_2\text{max}$ onkin yhteydessä pienempään tehontuoton laskuun suorassa testissä (Ferguson ym. 2016).

Korkean tyypin I lihassolujakauman henkilöillä MVC palautuu kolmen Wingaten jälkeen jo 20 minuutissa (Lievens ym. 2020). Paljon tyypin II lihassoluja omaavilla henkilöillä MVC ei vuorostaan ollut palautunut vielä 5 tuntia kolmen Wingaten jälkeen. Väsymys vaikutti olevan perifeeristä, sillä tahdonalainen lihasaktiivisuus ei laskenut kolmen Wingaten jälkeen. Korkean tyypin I lihassolujakauman omaaville koehenkilöillä oli hieman korkeampi $VO_2\text{max}$ (58 ml/kg/min vs. 53 ml/kg/min). Kokonaistyömäärä Wingatessa oli samanlainen korkean tyypin I ja tyypin II lihassolujakauman ryhmissä, eikä se voi täten selittää eroja palautumisessa. (Lievens ym. 2020) Sen sijaan Glaisterin ym. (2014) tutkimuksessa korkean (59 ml/kg/min) ja kohtalaisen (48 ml/kg/min) $VO_2\text{max}$ ryhmissä tehontuoton palautuminen Wingaten jälkeen oli samanlainen. Nämä tulokset viittaavat lihassolutyypin jakauman/irtiottokyvyn, mutta eivät $VO_2\text{max}$:n merkitykseen palautumisessa intensiivisestä kuormituksesta. Toisaalta esimerkiksi Vernillo ym. (2019) raportoivat, että $VO_2\text{max}$ oli positiivisesti yhteydessä voimantuoton palautumiseen 2 minuuttia intensiivisen isometrisen kuormituksen jälkeen.

Palautumiseen voivat vaikuttaa myös tekijät, joilla ei ole yhteyttä $VO_2\text{max}$:iin. Laktaattia (ja protoneja) poistavat lihassoluista verenkiertoon MCT:t (monocarboxylate transporter), lihassolujen solukalvolla sijaitsevat kuljetusproteiinit (Thomas ym. 2012). Thomas ym. (2005) raportoivat, että suuremmilla MCT:n (MCT1:n) pitoisuuksilla väsymysindeksi toistuvissa intensiivisissä suorituksissa on pienempi. MCT:n aktiivisuuksia voidaan kasvattaa varsinkin intensiivisellä kestävyysharjoittelulla (Thomas ym. 2012). Toisaalta MCT:n pitoisuudet eivät välttämättä korreloi $VO_2\text{max}$:n kanssa eikä harjoittelun aiheuttamat muutokset MCT:ssä välttämättä korreloi $VO_2\text{max}$:n muutosten kanssa (Evertsen ym. 2001). Huippusoutajilla MCT:n pitoisuus ja laktaatin poisto verenkierrosta oli positiivisesti yhteydessä MAOD:iin (Maciejewski ym. 2020), mikä viittaa muun muassa nopeuskestävyysharjoittelun merkitykseen MCT:n aktiivisuuden kasvussa.

Myöskään kaikissa tutkimuksissa $VO_2\text{max}$ ei ole ollut yhteydessä nopeampaan fosfokreatiinin pitoisuuksien palautumiseen (Cooke ym. 1997; Hug ym. 2006). Cooken ym. (1997) tutkimuksessa fosfokreatiinin pitoisuuksien palautumisessa ei ollut eroja korkean (64 ml/kg/min) ja kohtalaisen $VO_2\text{max}$:n ryhmän välillä (46 ml/kg/min) ja sama koski Hugin ym. (2006) tutkimusta (74 ml/kg/min vs. 54 ml/kg/min). Niinpä $VO_2\text{max}$ ei enää tietyn pisteen

jälkeen välttämättä ole yhteydessä suurempaan mitokondrioiden oksidatiiviseen kapasiteettiin ja täten nopeampaan fosfokreatiinin pitoisuuksien palautumiseen. Myöskään kaikissa tutkimuksissa selkeää yhteyttä VO_{2max} :n ja intervallikuormituksesta palautumisen välillä ei ole havaittu, varsinkaan jos tutkittavien VO_{2max} on ollut korkea (Tomlin & Wegner 2001).

Vaikka korkea VO_{2max} olisi yhteydessä nopeampaan fosfokreatiinitasojen tai pH:n palautumiseen, se ei välttämättä näy suorituskyvyssä, mikäli kuormitusten välissä on 15 minuutin palautumisjakso. Kolmen minuutin kestoisen, uupumukseen johtavan kuormituksen jälkeen fosfokreatiinin pitoisuudet ovat palautuneet lähes täydellisesti (96 %) 10 minuutin passiivisen palautumisen jälkeen (Chidnok ym. 2013c). Lisäksi luurankoli hasten pH oli palautunut lepotasolle 10 minuutissa (Chidnok ym. 2013c) ja Hugin ym. (2006) tutkimuksessa pH palautui intensiivisten kuormitusten jälkeen lepotasolle tai lähelle sitä 15 minuutissa. Niinpä happamuus ja fosfokreatiinin pitoisuudet eivät välttämättä rajoita suorituskykyä 15 minuutin palautusjaksoissa. Sen sijaan SR:n kalsiumin käsittelyn palautumisessa voi mennä yli 45 minuuttia neljä minuuttia kestäväen maksimaalisen kuormituksen jälkeen (Gejl ym. 2020). Rajoitteet SR:n kalsiumin käsittelyssä taas voivat mahdollisesti vaikuttaa paitsi hermoli hasjärjestelmän suorituskykyyn ja myös T_{lim} :iin. SR:n kalsiumin käsittelyä voidaan vuorostaan parantaa kestävyys harjoittelulla (Gejl ym. 2020).

Yhteenvetona voidaan todeta, että korkea VO_{2max} voi olla yhteydessä nopeampaan palautumiseen, sillä suurempi minuuttitilavuus auttaa muun muassa aineenvaihduntatuotteiden poistossa. Kestävyys harjoittelu kasvattaa VO_{2max} :n lisäksi muun muassa luurankoli hasten oksidatiivista kapasiteettiä, joka vuorostaan vaikuttaa muun muassa fosfokreatiinin uudelleensynteesiin kuormituksen jälkeen. VO_{2max} :n ja palautumisen suhde voi olla myös epäsuora. Suuren tyypin II lihassolujakauman omaavilla henkilöillä on tyypillisesti matalampi VO_{2max} , mutta parempi anaerobinen kapasiteetti ja irtiottokyky kuin suuren tyypin I lihassolujakauman omaavilla henkilöillä. Aerobisten ominaisuuksien merkitys palautumisessa saattaa myös riippua palautumisajasta. Lisäksi VO_{2max} :ssa voi olla raja, jonka jälkeen se ei enää ole yhteydessä nopeampaan palautumiseen tai palautumisen markkereihin.

3.2.2 VO₂max ja palautuminen armottoman kuormitusalueen kuormituksessa

Palautuminen ja siihen vaikuttavat tekijät voivat olla hieman erilaisia armottoman kuormitusalueen kuormituksessa (yli 2 minuuttia), kuin lyhyissä (alle 2 minuuttia) anaerobisissa kuormituksissa. Sama koskee palautumista eri aikaväleillä. Lisäksi väsymyksen vakiointi kuormituksessa on hankalaa. Kriittinen teho -mallilla voidaan mahdollisesti vakioda kuormitus paremmin, kuin jos koehenkilöt tekisivät kuormituksena tietyn matkan tai aika-ajon. Näin teoriassa kaikki koehenkilöt tekevät saman suhteellisen kuormituksen ja voidaan tutkia tarkemmin vain palautumiseen vaikuttavia tekijöitä.

Alla olevan kaavan mukaisesti

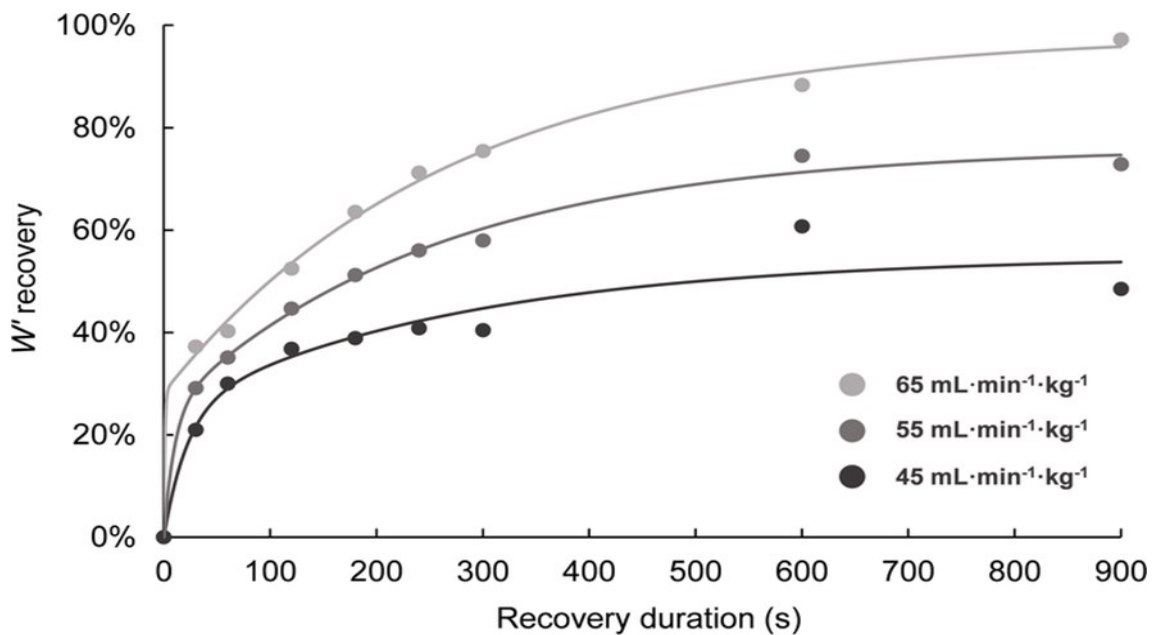
$$T_{\text{lim}} = W' / (P - CP)$$

jossa T_{lim} tarkoittaa armottoman kuormitusalueen kuormituksen kestoon, tehon pysyessä samana vakioitehoisessa kuormituksessa, kuormitusten kesto riippuu W' :stä ja sen palautumisesta. Toistuvissa tai intervallikuormituksissa W' laskee kriittisen tehon yläpuolella ja W' kasvaa tai palautuu ennalleen, kun kuormituksen teho on kriittisen tehon alapuolella (Coats ym. 2003). Toisin sanoen työn tekeminen kriittisen tehon yläpuolella vähentää väsymyksen takia akuutisti mekaanisen työn määrä mitä voidaan tehdä kriittisen tehon yläpuolella. Kuormituksen tehon ollessa kriittisen tehon alapuolella, W' eli mekaanisen työn määrä mitä voidaan tehdä kriittisen tehon yläpuolella voi kasvaa tai palautua ennalleen. Oletuksena W' :n ja kestävyysuorituskyvyn palautumisen yhteydessä on, että kriittinen teho pysyy vakiona. Tästä on näyttöä lyhytkestoisten intensiivisten kuormitusten osalta, joiden välissä on ollut 2–30 minuutin palautumisjakso (Ferguson ym. 2007; Burnley ym. 2011; Karsten ym. 2017).

W' :n eli käytännössä kestävyysuorituskyvyn palautumista on tutkittu useissa tutkimuksissa (Ferguson ym. 2010; Caen ym. 2019; Chorley ym. 2020). Tyypillisesti on tehty kuormitus, joka aiheuttaa uupumuksen esimerkiksi 6 minuutin kohdalla kaikilla koehenkilöillä eli W' on uupumuksessa käytännössä katsoen nolla. Seuraavaksi palautusjakson jälkeen on tehty uusi kuormitus samalla teholla, jolloin tämän jälkimmäisen kuormituksen kestosta voidaan määrittellä W' :n eli kestävyysuorituskyvyn palautuminen. Eli jos koehenkilöt ovat tehneet kuormituksen, joka aiheuttaa uupumuksen 6 minuutin kohdalla ja palautusjakson jälkeisen

kuormituksen kesto on 3 minuuttia, sekä kestävyysuorituskyky että W' ovat palautuneet 50 %. Selvyyden vuoksi tässä tutkielmassa käytetään tästedes termiä kestävyysuorituskyvyn palautuminen. Kestävyysuorituskyvyn palautumisella tarkoitetaan, että miten lähelle esim. 6 minuutin kohdalla uupumuksen aiheuttavaa kuormitusta on palaututtu, kun tehdään vaihtelevan palautusjakson jälkeen uusi kuormitus samalla teholla.

Kestävyysuorituskyvyn palautumisessa on ollut eroja tutkimusten välillä: noin 70 % (Felippe ym. 2020; Caen ym. 2021) ja 86 % 15 minuutissa (Ferguson ym. 2010). Eroja saattaa selittää muun muassa palautumistapa (aktiivinen vs. passiivinen). Caenin ym. (2021) tutkimuksessa VO_{2max} korreloi positiivisesti ($r = 0.62$) kestävyysuorituskyvyn palautumisen kanssa. Yksilöllinen vaihtelu palautumisessa voi olla huomattavaa, sillä korkean VO_{2max} :n koehenkilöt palautuivat lähes täysin ja matalan VO_{2max} :n vain 50 % (Caen ym. 2021), kuten kuvassa 8 näkyy.



KUVA 8. Mallinnus VO_{2max} in ja W' :n eli kestävyysuorituskyvyn palautumisen yhteydestä (Caen ym. 2021). Korkeampi VO_{2max} korreloi nopeamman palautumisen kanssa.

Myös huippupyöräilijöillä (VO_{2max} 75 ml/kg/min) kestävyysuorituskyvyn aika-ajoissa on havaittu palautuvan nopeammin kuin hyvin harjoitelleilla pyöräilijöillä (VO_{2max} 53 ml/kg/min) 5 minuutin palautusjakson aikana (Ducrocq ym. 2021). Chorleyn ym. (2020) tutkimuksessa tehtiin kolme suoraa testiä 2 minuutin palautuksilla. Suorituskyvyn palautuminen korreloi VO_{2max} :iin hyvin harjoitelleilla pyöräilijöillä, mutta ei fyysisesti

aktiivisilla henkilöillä. Fyysisesti aktiivisilla henkilöillä suurempi W' oli yhteydessä hitaampaan kestävyysuorituskyvyn palautumiseen. (Chorley ym. 2020) Myös Chorleyn ym. (2022) samankaltaisella kuormitusprotokollalla tehdyssä tutkimuksessa kestävyysuorituskyvyn palautuminen korreloi VO_{2max} :n kanssa. Caenin ym. (2019) tutkimuksessa vuorostaan kestävyysuorituskyky palautui hitaammin, kun koehenkilöt tekivät kuormituksen, jossa uupumus tapahtui 8 minuutin kohdalla kuin 4 minuutin kohdalla. Uupumuksessa pH oli samanlainen molemmilla kuormituksen kestoilla (Caen ym. 2019).

Niinpä W' :n suuruus ja kuormituksen intensiteetti ja/tai kesto saattavat olla itsenäisiä tekijöitä, jotka vaikuttavat kestävyysuorituskyvyn palautumiseen. Toisaalta Caenin ym. (2019) tutkimuksessa palautusjaksot olivat lyhyitä (6 min tai alle). Niinpä on epäselvää, vaikuttaako W' :n suuruus tai kuormituksen kesto palautumiseen pidemmällä (10–15 min) aikavälillä. Lisäksi Chorleyn ym. (2020) tutkimuksessa hyvin harjoitelleilla pyöräilijöillä W' :n suuruuden ja kestävyysuorituskyvyn palautumisen välillä ei ollut tilastollisesti merkittävää korrelaatiota. Skiban ym. (2015) tutkimuksen tulokset olivat samankaltaisia.

VO_{2max} :n lisäksi myös kriittisellä teholla on havaittu positiivinen korrelaatio kestävyysuorituskyvyn palautumiseen 10–15 minuutin palautusjakson aikana (Caen ym. 2021; do Nascimento Salvador ym. 2021). Lyhyellä aikavälillä (alle minuutti) kestävyysuorituskyvyn palautuminen on yhteydessä fosfokreatiinin palautumiseen (Chidnok ym. 2013b), mutta toisaalta fosfokreatiinin pitoisuudet palautuvat nopeammin kuin kestävyysuorituskyky (Skiba ym. 2015). Nämä tutkimukset kuitenkin viittaavat aerobisten ominaisuuksien merkitykseen kestävyysuorituskyvyn palautumisessa. Toisaalta kriittisen tehon ja VO_{2max} :iin vaikuttavien tekijöiden suhde ei ole samanlainen, esimerkiksi luurankolihasien mitokondrioiden oksidatiivisen kapasiteetin osalta. Lisäksi esimerkiksi Felipen ym. (2020) tutkimuksessa ei havaittu korrelaatiota kriittisen tehon ja kestävyysuorituskyvyn palautumisessa.

Caenin ym. (2021) tutkimuksessa lihassolutyypin jakaumalla ei ollut yhteyttä kuormituksen palautumiseen 15 minuutin kohdalla. Lisäksi W' :n ja pH:n laskun sekä palautumisen välillä ei Skiban ym. (2015) tutkimuksessa havaittu korrelaatiota. Nämä tulokset viittaavat, että irtiottokyky ei vaikuttanut palautumiseen. Toisaalta Caenin ym. (2021) tutkimuksessa tarkasteltiin kestävyysuorituskyvyn palautumista kahdeksalla eri palautusajalla (30 s – 15 min). Tietyillä palautumisen kestoilla tyypin I lihassolujen osuudella oli positiivinen korrelaatio

ja tyypin IIX lihassolujen osuudella negatiivinen korrelaatio kestävyys suorituskyvyn palautumisen kanssa. Lisäksi erot koehenkilöiden lihassolutyypin jakaumassa olivat pieniä. (Caen ym. 2021)

Kestävyys suorituskyvyn ja hermolihasjärjestelmän palautuminen eivät välttämättä tapahdu samalla nopeudella. Isometrinen voimantuotto laskee armottoman kuormitusalueen kuormituksen jälkeen enemmän kuin (pyöräillen testattu) dynaaminen voiman- tai tehontuotto ja myös palautuu hitaammin (Kruger ym. 2019). Monet väsymystekijät (mm. protonit, epäorgaaninen fosfaatti ja kalsiumin vapautuminen SR:stä) sen sijaan oletettavasti vaikuttavat sekä kestävyys suorituskykyyn että hermolihasjärjestelmän suorituskykyyn. Sen sijaan energiavarastojen riittävyys (fosfokreatiini- ja glykogeenivarastot) vaikuttaa T_{lim} :iin, mutta todennäköisesti ei niin merkittävästi hermolihasjärjestelmän testeihin, ainakaan palautumismittauksissa (10 min kuormituksen jälkeen). Glykogeenivarastot voivat tyhjentyä hieman yli 20 % maksimaalisessa 4 minuutin kuormituksessa, mutta jopa 50 % tietyissä osissa lihassoluja (Gejl ym. 2017). Tästä syystä glykogeenivarastojen hupeneminen saattaa vaikuttaa suorituskykyyn toistuvissa P_{max} -testeissä.

Ducrocqin ym. (2021) tutkimuksessa minuutin ja 10 minuutin aika-ajojen jälkeen MVC laski vähemmän, mutta palautui hitaammin kohti lepotasoa huippupyöräilijöillä kuin hyvin harjoitelleilla pyöräilijöillä. Huippupyöräilijöillä MVC oli lähempänä lepotasoa neljän minuutin palautumisjakson jälkeen mutta ei enää 15 minuutin palautumisjakson jälkeen. Toisaalta 15 minuutin palautumisjakson jälkeiset MVC:t tehtiin vasta toisen aika-ajon jälkeen ja MVC palautui hitaammin toisen aika-ajon jälkeen kuin ensimmäisen aika-ajon. Lisäksi hyvin harjoitelleiden pyöräilijöiden ryhmän VO_2max oli 53 ml/kg/min. (Ducrocq ym. 2021) Mahdollisesti matalamman VO_2max :n ryhmään verrattuna eroja olisi havaittu myös 15 minuutin palautumisjakson jälkeisissä mittauksissa. Vuorostaan Felipen ym. (2020) tutkimuksessa kestävyys suorituskyvyn palautuminen korreloi MVC:n palautumisen ja kestävyys suorituskyvyn palautuminen näyttäisi taas korreloivan aerobisten ominaisuuksien kanssa. W' :n vaikuttavat voimantuotto-ominaisuudet, mikä saattaa selittää yhteyttä kestävyys suorituskyvyn ja MVC:n palautumisen kanssa.

Hypoteesina tässä tutkielmassa on, että VO_2max :illa on positiivinen korrelaatio kestävyys suorituskyvyn ja hermolihasjärjestelmän palautumiseen. Kriittinen teho -mallin mukaan, jos kestävyys suorituskyky (ja W') palautuu P_{max} -testin jälkeen 15 minuutissa 70 %,

myös tätä seuraavan P_{\max} -testin jälkeen kestävyys suorituskyvyn pitäisi palautua 70 %. Nimittäin ensimmäisen P_{\max} -testin uupumuksessa W' on nolla ja jos esimerkiksi 15 minuutissa suorituskyky (ja W') palautuu 70 % toiseen P_{\max} -testiin, saman pitäisi tapahtua myös toisen ja kolmannen testin välillä. Niinpä toisella ja kolmannella T_{\lim} :illä ei pitäisi olla suuria eroja, koska teho P_{\max} -testeissä on sama ja jos niiden väliset palautumisajat ovat identtisiä. Toisaalta toistuvat erittäin intensiiviset kuormitukset voivat hidastaa kestävyys suorituskyvyn palautumista (Chorley ym. 2020; Chorley ym. 2022).

$VO_{2\max}$:n ja kestävyys suorituskyvyn tai hermolihasjärjestelmän palautumisen välinen positiivinen korrelaatio sisältääkin muutamia oletuksia. Esimerkiksi sen, että T_{\lim} :n kesto ei vaikuta palautumiseen, mutta tätä oletusta vastaan löytyy näyttöä. Jos pidempi T_{\lim} :n kesto hidastaa palautumista, oletuksena taustalla olisi, että $VO_{2\max}$:illa ei ole korrelaatiota T_{\lim} :iin (ensimmäinen hypoteesi). Tai $VO_{2\max}$:in merkitys palautumisessa on suurempi, kumoten pidemmän T_{\lim} :n keston palautumista hidastavan vaikutuksen.

4 TUTKIMUSKYSYMYKSET JA HYPOTEESEIT

Tutkimuskysymys 1: Onko $VO_2\text{max}$:lla korrelaatiota T_{lim} :iin?

Hypoteesi: $VO_2\text{max}$:lla ei ole korrelaatiota T_{lim} :n kanssa.

Perustelu: $VO_2\text{max}$:lla ei ole korrelaatiota W' :n (mekaaniseen työhön, jota voidaan tehdä kriittisen tehon yläpuolella) homogeenisessä ryhmässä (Murgatroyd ym. 2011). Kun P_{max} määritetään suoran testin maksimitehona, T_{lim} (uupumusaika kyseisellä teholla) riippuu W' :stä: mitä suurempi W' , sitä pidempi T_{lim} .

Tutkimuskysymys 2: Onko $VO_2\text{max}$:lla korrelaatiota kestävyysuorituskyvyn palautumiseen P_{max} -testissä?

Hypoteesi: $VO_2\text{max}$:lla on korrelaatio kestävyysuorituskyvyn palautumiseen P_{max} -testissä.

Perustelu: Korkeampi $VO_2\text{max}$ voi auttaa aineenvaihduntatuotteiden poistossa aktiivisista lihaksista kuormituksen jälkeen. Lisäksi korkeampi $VO_2\text{max}$ on muun muassa yhteydessä nopeampaan fosfokreatiinin uudelleensynteesiin ja pienempään väsymykseen välittömästi kuormituksen jälkeen. Lihassolutyypijakauma vaikuttaa irtiottokykyyn ja korkea $VO_2\text{max}$ korreloi tyypillisesti korkean tyypin I lihassolujakauman kanssa. Caenin ym. (2021) tutkimuksessa korkeampi $VO_2\text{max}$ korreloi kestävyysuorituskyvyn palautumisen kanssa.

Tutkimuskysymys 3: Onko $VO_2\text{max}$:lla korrelaatiota hermolihasjärjestelmän palautumiseen?

Hypoteesi: $VO_2\text{max}$:lla on korrelaatio hermolihasjärjestelmän palautumiseen.

Perustelu: Korkeampi $VO_2\text{max}$ voi auttaa aineenvaihduntatuotteiden poistossa aktiivisista lihaksista kuormituksen jälkeen. Lisäksi korkeampi $VO_2\text{max}$ on muun muassa yhteydessä nopeampaan fosfokreatiinin uudelleensynteesiin ja pienempään väsymykseen välittömästi kuormituksen jälkeen. Lihassolutyypinjakauma vaikuttaa irtiottokykyyn ja korkea $VO_2\text{max}$ korreloi tyypillisesti korkean tyypin I lihassolujakauman kanssa. Esimerkiksi Vernillon ym. (2019) tutkimuksessa hermolihasjärjestelmän palautuminen korreloi $VO_2\text{max}$:n kanssa.

5 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimus suoritettiin kolmena eri päivänä. Ensimmäisenä mittauspäivänä tehtiin suora testi polkupyöraergometrillä. Toisena ja kolmantena päivänä tehtiin suoran testin maksimiteholla (P_{\max}) kuormituksia polkupyöraergometrillä uupumukseen saakka. Toisena päivänä P_{\max} -testi tehtiin kolmesti ja 24 tuntia myöhemmin kolmantena päivänä P_{\max} -testi tehtiin kerran. P_{\max} -testiä ennen ja testin jälkeen koehenkilöt tekivät hermolihasjärjestelmän testit, isometrisen maksimivoimatestin (MVC) ja kevennyshypyn (CMJ) sekä heiltä otettiin sormenpäästä verinäyte laktaatin analysointia varten. Suorassa testissä ja P_{\max} -testeissä koehenkilöiden ventilaatio ja hengityskaasuja mitattiin hengityskaasuanalysointorin avulla. Tutkimuksen kaikki mittaukset suoritettiin Jyväskylän yliopiston tiloissa. Tutkimus oli tutkimuseettisen neuvottelukunnan hyväksymä (866/13.00.04.00/2021). Tutkimuksesta tehtiin kaksi pro gradu -tutkielmaa ja yksi kandidaatin tutkielma tämän tutkielman lisäksi. Tässä tutkielmassa ei käsitellä tutkimuksessa mukana ollutta kolmatta testipäivää. Suorituskyvyn palautumista vuorokauden aikana sekä palautumisen korrelaatiota $VO_{2\max:n}$ kanssa käsiteltiin Simolan (2021) tutkielmassa.

5.1 Koehenkilöt

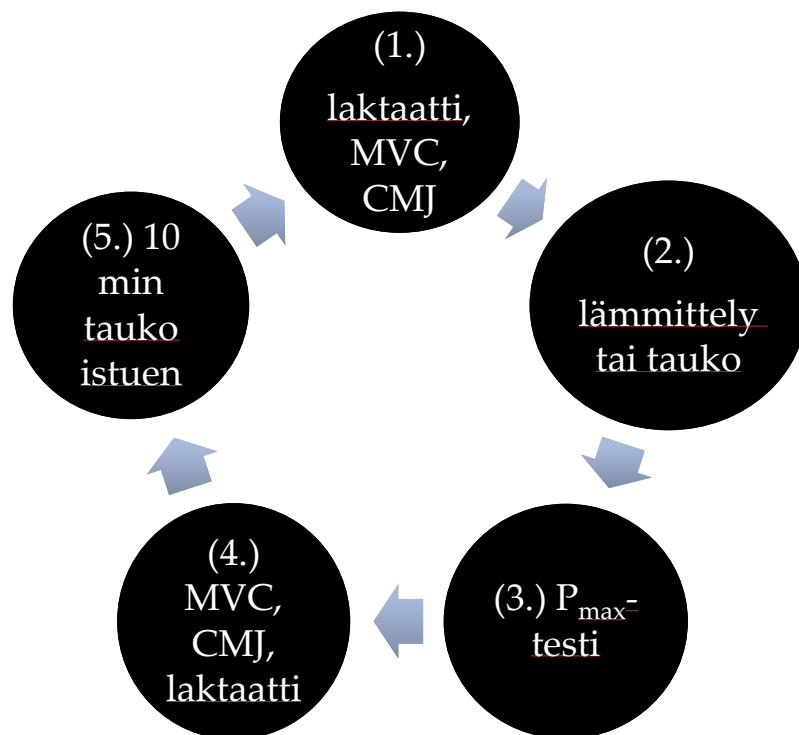
Tutkimukseen osallistui 20 miespuolista koehenkilöä (ikä 29.7 ± 5.7 vuotta). Koehenkilöiden pituus oli 179.6 ± 7.9 cm ja paino 85.5 ± 11.4 kg. Kaikilla koehenkilöillä oli taustaa kamppailulajeista (hokutoryu, lukkopaini tai kreikkalaisroomalainen paini) vähintään vuoden verran. Koehenkilöiden rekrytointi tehtiin sähköpostin kautta Jyväskylän alueen kamppailulajiseuroille. Kaikki koehenkilöt antoivat kirjallisen suostumuksen tutkimukseen ja täyttivät terveystarkastuksen. Koehenkilöt olivat terveitä, eikä heillä ollut sairauksia tai loukkaantumisia, jotka olisivat rajoittaneet tutkimukseen osallistumista.

5.2 Kuormitukset

Ensimmäisellä mittauskerralla koehenkilöt suorittivat suoran testin polkupyöraergometrillä ja harjoittelivat MVC:tä sekä CMJ:tä P_{\max} -testipäivä varten. Suora testi aloitettiin 75 watin kuormalla ja kuormaa nostettiin 25 wattia joka toinen minuutti. Suoraa testiä edelsi 5 minuutin

lämmittely 75 watin kuormalla ja parin minuutin dynaaminen venyttely. Suora testi ja P_{\max} -testit katsottiin päättyneeksi, jos polkupyöraergometrin kadenssi laski alle 60 kierrokseen minuutissa kannustuksesta huolimatta. Maksimiteho (P_{\max}) suorassa testissä määritettiin 5 watin tarkkuudella uupumisajan perusteella.

Suoran testin ja P_{\max} -testipäivien välissä oli taukoa tyypillisesti viikko. Vuorokauden aikainen vaihtelu $VO_2\max$:ssa on keskimäärin 5 ml/kg/min (Knaier ym. 2019), minkä takia tietyn koehenkilön testit pyrittiin tekemään samaan aikaan vuorokaudesta. Koehenkilöitä oli pyydetty olemaan nauttimatta kofeiinia kuormituspäivinä ja välttämään raskasta fyysistä kuormitusta mittausta edeltävinä päivinä. Kuormitusten aikana koehenkilöt saivat juoda vettä, mutta eivät saaneet syödä tai juoda mitään muuta. Koehenkilöt punnittiin ennen kaikkia mittauksia. Koehenkilöitä kannustettiin kaikkien suoritusten aikana ja heille annettiin palautetta heidän suorituksestaan suoran testin ja P_{\max} -testien aikana sekä niiden jälkeen. Kuvassa 9 on havainnollistettu ensimmäisen P_{\max} -testipäivän protokollaa.



KUVA 9. Tutkimusprotokolla ensimmäisenä P_{\max} -päivänä. Lämmittely suoritettiin vain ennen ensimmäistä P_{\max} -testiä. Laktaatinoton, MVC:n ja CMJ:n jälkeen oli lyhyt tauko ennen toista ja kolmatta P_{\max} -testiä. Testipäivä päättyi 10 minuutin tauon jälkeisiin laktaatti-, MVC- ja CMJ-mittauksiin.

P_{\max} -päivänä koehenkilöt lämmittelivät polkupyöraergometrillä 5 minuuttia 75 wattilla ja tekivät dynaamisia venyttelyjä 5 minuuttia ajan ennen MVC:tä ja CMJ:tä. MVC:n ja CMJ:n jälkeen koehenkilöt tekivät vielä erillisen lämmittelyn P_{\max} -testiä varten. Kyseinen lämmittely tehtiin polkupyöraergometrillä ja se koostui pyöriälystä 3 minuutin ajan 70 % P_{\max} :sta sekä kahdesta 30 sekunnin suorituksesta P_{\max} :lla, joiden välillä oli noin minuutin tauko. Lyhyen aerobisen lämmittelyn (alle 15 min) ja parin lyhyen kilpailuvauhdilla tehtävän suorituksen pitäisi parantaa suorituskykyä korkean intensiteetin suorituksissa (McGowan ym. 2015). Lämmittely tehtiin P_{\max} -päivänä ainoastaan ennen ensimmäistä P_{\max} -testiä.

P_{\max} -päivänä koehenkilöt tekivät MVC:n ja CMJ:n välittömästi P_{\max} -testien jälkeen. MVC:ssä koehenkilöjä ohjeistettiin työntämään voimalevyä maksimaalisesti ja mahdollisimman räjähtävästi sekä pitämään maksimaalista voimantuottoa parin sekunnin ajan. Kaikki MVC:t tehtiin 110 asteen polvikulmalla. CMJ:ssä koehenkilöjä oli ohjeistettu suorittamaan hyppy ja alastulo samalla tavalla (polvinivelet täydessä ojennuksessa). MVC tehtiin aina ennen CMJ:tä ja molemmissa koehenkilöt tekivät aina kaksi suoritusta.

P_{\max} -testien jälkeisten hermolihasjärjestelmän testien jälkeen koehenkilöt ohjeistettiin istumaan tuolille 10 minuutiksi. Tämän 10 minuutin palautumisjakson jälkeen koehenkilöt suorittivat uudet MVC:t ja CMJ:t. Hermolihasjärjestelmän testien jälkeen koehenkilöt saivat valmistautua valitsemallaan tavalla ennen seuraavaa P_{\max} -testiä. P_{\max} -testien välinen tauko oli 15 minuuttia taukoa. MVC ja CMJ suoritettiin myös viimeisen P_{\max} -testin jälkeisen 10 minuutin passiivisen palautuksen jälkeen. MVC:t ja CMJ:t tehtiin täten kaiken kaikkiaan seitsemän kertaa: pre1 eli ennen ensimmäistä P_{\max} -testiä, post1 eli välittömästi P_{\max} -testin jälkeen ja pre2, post2, pre3, post3 sekä post3+10 eli 10 minuuttia post3:n jälkeen. Myös pre2 ja pre3 tehtiin 10 minuuttia post2:n ja post 3:n jälkeen. Näin jokaiseen yksittäiseen P_{\max} -testiin liittyi hermolihasjärjestelmän testi ennen P_{\max} -testiä, välittömästi jälkeen ja 10 minuuttia välittömästi P_{\max} -testin jälkeen tehtyjen hermolihasjärjestelmän testien jälkeen.

5.3 Mittausmenetelmät, välineet ja muuttujat

Suora testi ja P_{\max} -testi tehtiin Monarkin (LC4) sähköisellä polkupyöraergometrillä, joka oli yhdistetty Monarkin tietokoneohjelmaan (Monark test software versio 1.1.9.0). Polkupyöraergometrillä tehtävien kuormitusten aikana hengitysmuuttujia mitattiin breath-by-

breath menetelmällä hengityskaasuanalysaattorilla (Vyntus™ CPX Metabolic Cart, Vyair Medical GmbH, Hoechberg, Saksa), joka oli kytketty Vyairin SentrySuite-tietokoneohjelmaan. Vyairin järjestelmään tallennettiin hengityskaasuja 5 henkäyksen keskiarvona. Polkupyöraergometrillä tehtävien kuormitusten aikana mitattiin hapenottoa (ml/min), hiilidioksidin poistoa (ml/min), ventilaatiota (l/min), sydämen sykettä (/min). Sykkeen mittaamiseen käytettiin Polarin sykevyötä (Polar Pro Strap, Polar Electro Oy, Kempele, Suomi) ja sykesensoria (Polar H10, Polar Electro Oy, Kempele, Suomi), joka oli paritettu hengityskaasuanalysaattorin kanssa. Hengityskaasuista arvoja tarkasteltiin 30 sekunnin keskiarvoina.

Koehenkilöiltä otettiin sormenpästä verta kapillaareihin veren laktaattipitoisuuden analysoimista varten hermolihasjärjestelmän testien yhteydessä. Näytteet otettiin ennen ensimmäistä (hermolihasjärjestelmän testejä edeltävää) lämmittelyä, ennen P_{max} -testiä edeltävää MVC:tä (pre MVC) ja CMJ:tä (pre CMJ) sekä välittömästi P_{max} -testin jälkeisten MVC:n (post MVC) ja CMJ:n (post CMJ) jälkeen. Laktaattinäytteet otettiin sormenpästä kapillaareihin ja analysoitiin Biosen S line Lab+ -analysaattorilla (EKF Diagnostic, Magdeburg, Saksa). MVC:t tehtiin isometrisen jalkaprässinä Jyväskylän yliopiston jalkadynamometrillä ja tulokset (MVC:n huippuarvo) rekisteröitiin sekä analysoitiin Signal-ohjelmalla (versio 4.11). CMJ:n mittaukseen käytettiin kontaktimattoa.

Jokaisen MVC:n ja CMJ:n mittausten suorituksista vain ensimmäinen analysoitiin, mikäli suorituksesta saatiin tulos ja se oli tehty ohjeiden mukaisesti. MVCV:tä eli MVC-väsymys tarkasteltiin tiettyä P_{max} -testin jälkeisen MVC:n erotuksen P_{max} -testiä edeltävään MVC:hen (absoluuttinen MVCV) ja MVC:n prosentuaalisena laskuna Pre MVC:stä Post MVC:hen (suhteellinen MVCV). Suhteellinen palautuminen MVC:ssä ja CMJ:ssä määritettiin P_{max} -testejä edeltävien MVC:n/CMJ:n (pre-mittaukset) tulosten prosentuaalisena palautumisena, esim. toista P_{max} -testiä edeltävän CMJ-tuloksen prosentuaalinen osuus ensimmäisen P_{max} -testiä edeltävään CMJ:hin. MVC-tuloksen palautumista tarkasteltiin myös MVC post1-mittauksen palautumisella MVC pre2:n $(100 - MVC\ post1 / MVC\ pre\ 2 * 100)$. Testipäivän aikana kasaantunut väsymys määriteltiin post 3+10:n MVC:n/CMJ:n prosentuaalisena laskuna pre1-mittauksista. T_{lim} määriteltiin P_{max} -testin uupumusaikana ja kestävyys suorituskyvyn palautuminen jälkimmäisen T_{lim} :n prosentuaalisena osuutena edellisestä T_{lim} :stä. VO_{2max} määriteltiin suoran testin painokiloon suhteutetun hapenoton (ml/kg/min) maksimaalisena 30 sekunnin keskiarvona, ellei toisin mainita.

5.4 Tilastollinen analyysi

Kaikki tämän tutkielman aineisto analysoitiin IBM SPSS Statistics 26.0 -ohjelmalla. Kaikkien muuttujien normaalijakauma testattiin Shapiro-Wilkin testillä. VO₂max:n korrelaatiota T_{lim}:iin MVCV:hen, hermolihasjärjestelmän sekä kestävyysuorituskyvyn palautumiseen testattiin Pearsonin korrelaatiokertoimella. Mikäli jokin muuttuja ei ollut normaalijakautunut, korrelaatiota testattiin Spearmanin järjestyskorrelaatiokertoimella. Hapenoton, MVC:n, CMJ:n ja T_{lim}:n keskiarvojen varianssia eri mittauksissa analysoitiin toistomittausten varianssianalyysillä. Jos Mauchlyn testissä mittausten väliset varianssit eivät olleet yhtä suuret, käytettiin Greenhouse-Geisserin testiä, muussa tapauksessa oletettua sfäärisyyttä. Mikäli tilastollinen merkitsevyys havaittiin toistomittausten varianssianalyysissä, parillisten mittausten välisten erojen selvittämiseen käytettiin Bonferronin korjausta. Ei-normaalijakautuneiden muuttujien keskiarvojen varianssia analysoitiin Friedmanin testillä. Kaikissa tilastoanalyysissä tilastollisen merkitsevyyden p-arvon rajaksi asetettiin $p < 0,05$.

Yhdeltä kohdehenkilöltä ei saatu tuloksia MVC post1:n mittauksessa. Lisäksi yhdeltä koehenkilöltä ei saatu luotettavaa tulosta MVC post3:n mittauksessa. Näitä muuttujia analysoitaessa otos oli 19 ja MVCV:n toistettavuutta analysoitaessa otos oli 18. Kaikissa muissa analyysissä otos oli 20.

6 TULOKSET

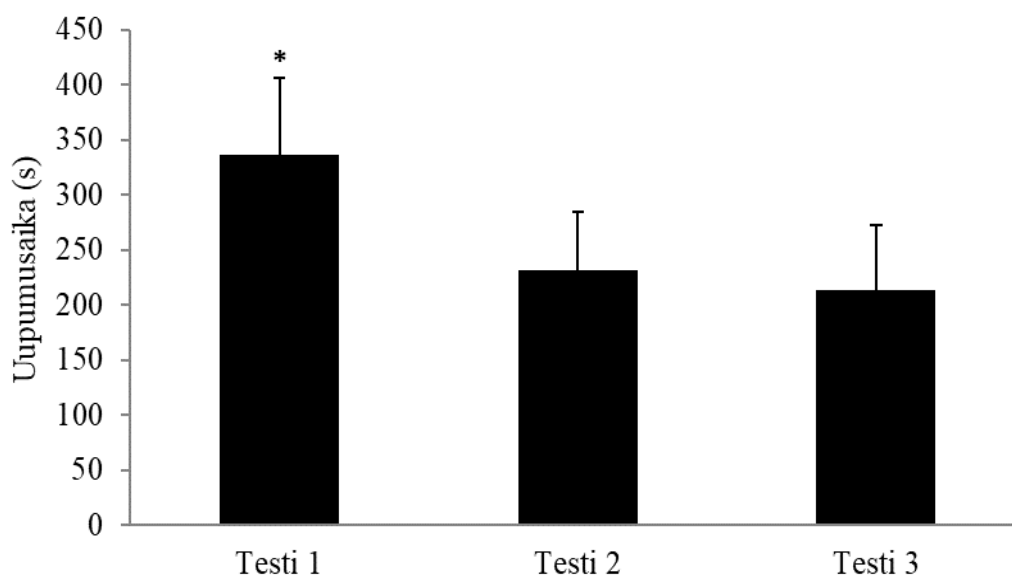
Suoran testin P_{\max} ja $VO_{2\max}$ sekä P_{\max} -testien $VO_{2\max}$ löytyy taulukosta 2. $VO_{2\max}$:ssa ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa eri testien välillä ($p = 0,309$). Absoluuttinen $VO_{2\max}$ suorassa testissä oli 3990 ± 447 ml/min.

TAULUKKO 2. Suoran testin ja P_{\max} -testien tuloksia.

Muuttuja	Arvo
P_{\max}	$312 \pm 36,3$ W
$VO_{2\max S}$	47.3 ± 7.1 ml/kg/min
$VO_{2\max 1}$	46.8 ± 6.3 ml/kg/min
$VO_{2\max 2}$	47.3 ± 6.6 ml/kg/min
$VO_{2\max 3}$	46.3 ± 7.0 ml/kg/min

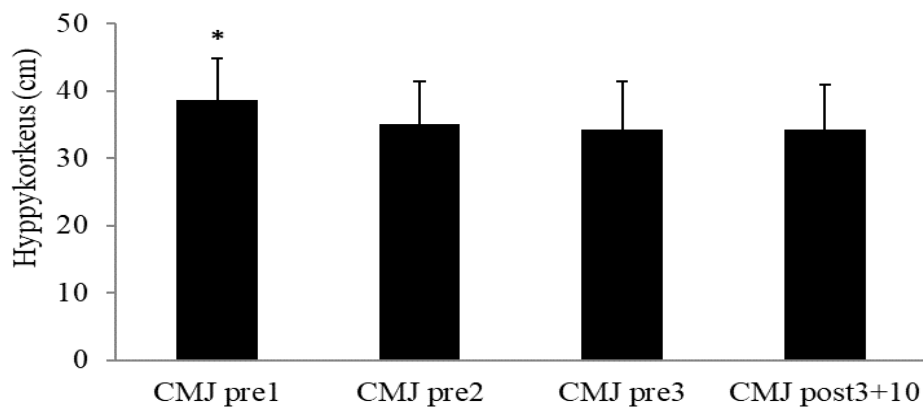
P_{\max} , maksimiteho suorassa testissä. $VO_{2\max S}$, maksimaalinen hapenotto suorassa testissä. $VO_{2\max 1}$, maksimaalinen hapenotto ensimmäisessä P_{\max} -testissä. W, wattia. Kaikki $VO_{2\max}$ -arvot testien korkeimpia 30 sekunnin keskiarvoja.

T_{\lim} (uupumusaika) P_{\max} -testeissä löytyy kuvasta 10. Ensimmäinen testi (336 ± 70 s) oli tilastollisesti merkittävästi pidempi ($p < 0,05$) kuin toinen (231 ± 54 s) tai kolmas testi (213 ± 59 s). Sen sijaan toisen ja kolmannen T_{\lim} :n välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa ($p = 0,242$).

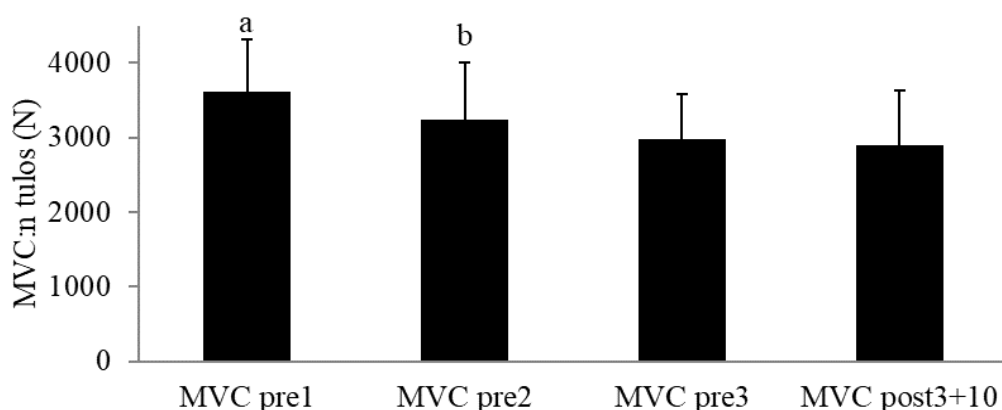


KUVA 10. Uupumusaika P_{\max} -testeissä. Arvot ovat keskiarvoja, hajontapylväät kuvaavat keskihajontaa. * $p < 0,05$, tilastollisesti merkitsevä ero muihin testeihin verrattuna.

Kuvasta 11 nähdään CMJ:n tulokset pre-mittauksista ja 10 minuuttia viimeisen P_{\max} -testin jälkeen tehdystä post3-mittauksesta (CMJ post 3+10), kuvassa 12 vuorostaan samat mittaukset MVC:n osalta. Ennen P_{\max} -testejä tehty CMJ pre1 ja MVC pre1 olivat tilastollisesti merkittävästi ($p < 0,05$) suurempia kuin muut CMJ:n tai MVC:n mittaukset. Muiden mittausten välillä ei ollut tilastollisesti merkittävää eroa CMJ:ssä ($p > 0,05$). MVC pre2 oli tilastollisesti merkitsevästi suurempi ($p < 0,05$) kuin MVC pre3 ja MVC post 3+10. MVC pre3:n ja MVC post3+10:n välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa ($p > 0,05$).

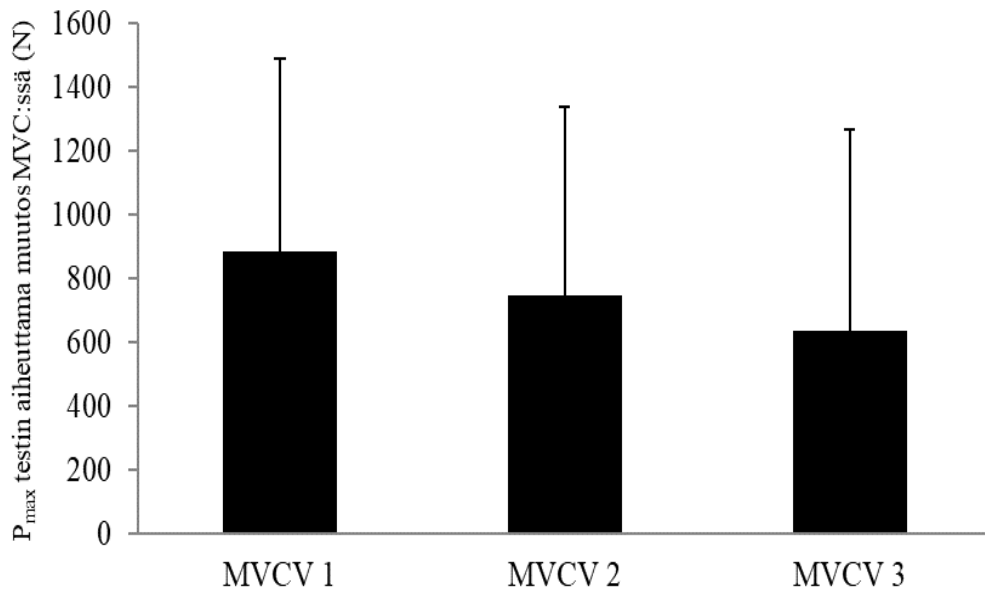


KUVA 11. CMJ:n hyppykorkeus eri mittauksissa. Arvot ovat keskiarvoja, hajontapylväät kuvaavat keskihajontaa. * $p < 0,05$, tilastollisesti merkitsevä ero muihin testeihin verrattuna. CMJ, kevennyshyppy. pre, ennen P_{\max} -testiä. post 3+10, 10 minuutin päästä viimeistä P_{\max} -testiä seuranneesta post3-mittauksesta.



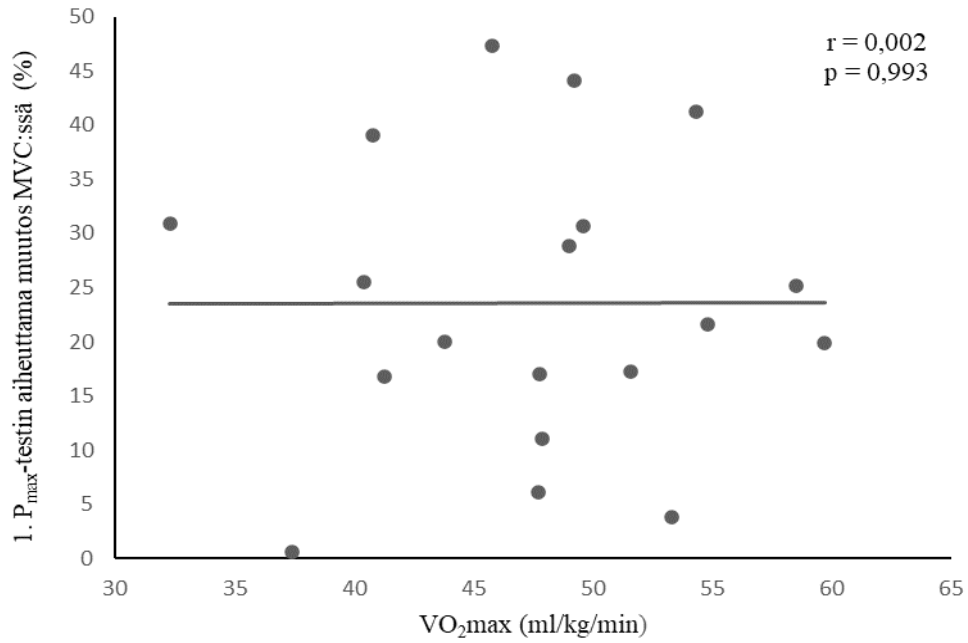
KUVA 12. MVC:n tulokset eri mittauksissa. Arvot ovat keskiarvoja, hajontapylväät kuvaavat keskihajontaa. a, tilastollisesti merkitsevä ero muihin testeihin verrattuna. b, tilastollisesti merkitsevä ero MVC pre3:n ja MVC post3+10:n kanssa. MVC, maksimaalinen isometrinen voimatesti. CMJ, kevennyshyppy. pre, ennen P_{\max} -testiä. post 3+10, 10 minuutin päästä viimeistä P_{\max} -testiä seuranneesta post3-mittauksesta.

Kuvassa 13 havainnollistetaan MVC:n avulla mitattua P_{\max} -testeissä muodostunutta väsymystä eli MVC:n laskua P_{\max} -testiä edeltävästä MVC:stä välittömästi P_{\max} -testien jälkeiseen MVC:hen. MVC:n muutoksissa ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja ($p = 0,051$). Suhteellinen lasku MVC:ssä oli noin 20 prosenttia eri mittauksissa, laskun ollessa keskimäärin 23.5 % MVCV1:ssä.

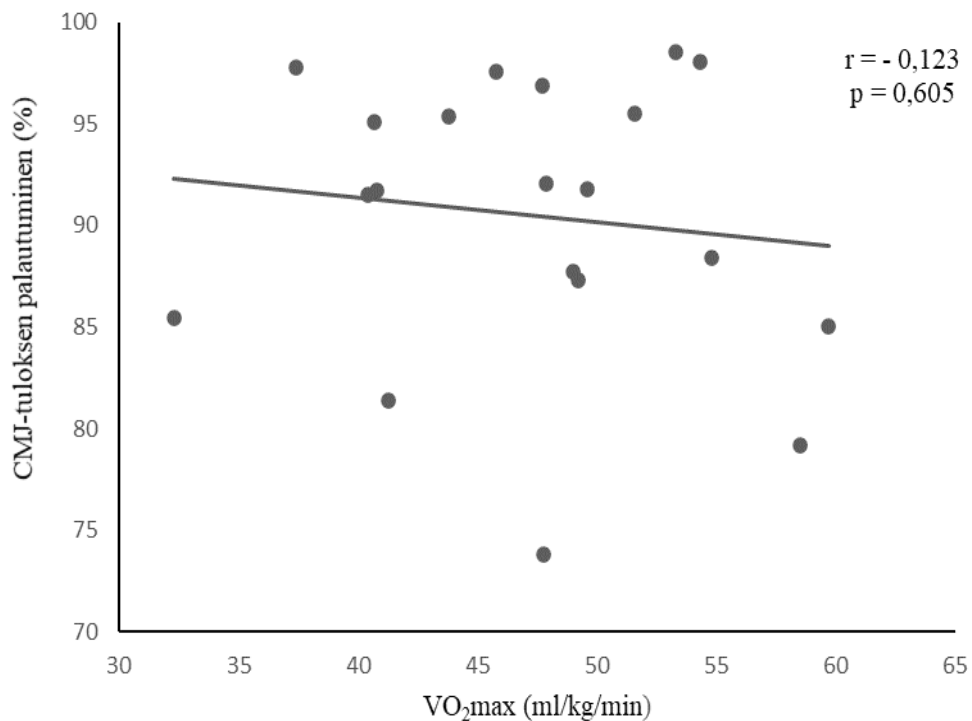


KUVA 13. P_{\max} -testeihin liittyvä väsymys MVC:ssä (MVCV). MVCV 1 kuvastaa eroa pre1- ja post1-mittausten välillä eli kuinka paljon MVC laski ensimmäisen P_{\max} -testin seurauksena. MVCV 2 taas kuvastaa eroa pre2- ja post2 -mittausten välillä. MVCV 3 vuorostaan kertoo eron pre3- ja post3-mittausten välillä. Arvot ovat keskiarvoja, hajontapylväät kuvaavat keskihajontaa.

$VO_{2\max}$:illa ei ollut yhteyttä akuuttiin väsymykseen MVC:ssä ($p > 0,05$). Tämä koski sekä absoluuttista laskua että prosentuaalista laskua MVC:ssä. MVCV 1:n ja $VO_{2\max}$:in välinen riippuvuussuhde nähdään kuvassa 14. $VO_{2\max}$:illa ei ollut myöskään tilastollisesti merkittävää korrelaatiota MVC:n tai CMJ:n tulosten absoluuttisen tai suhteellisen palautumisen kanssa ($p > 0,05$). Kuvasta 15 löytyy CMJ-tuloksen suhteellisen palautumisen korrelaatio $VO_{2\max}$:n kanssa. Suhteellinen palautuminen tarkoittaa kuvassa toista P_{\max} -testiä edeltävän CMJ-tuloksen (CMJ pre2) prosentuaalista osuutta ensimmäistä P_{\max} -testiä edeltävään CMJ:n tulokseen (CMJ pre1). CMJ pre2 oli keskimäärin 90,5 % ($\pm 6,9$ %) CMJ pre1:stä.

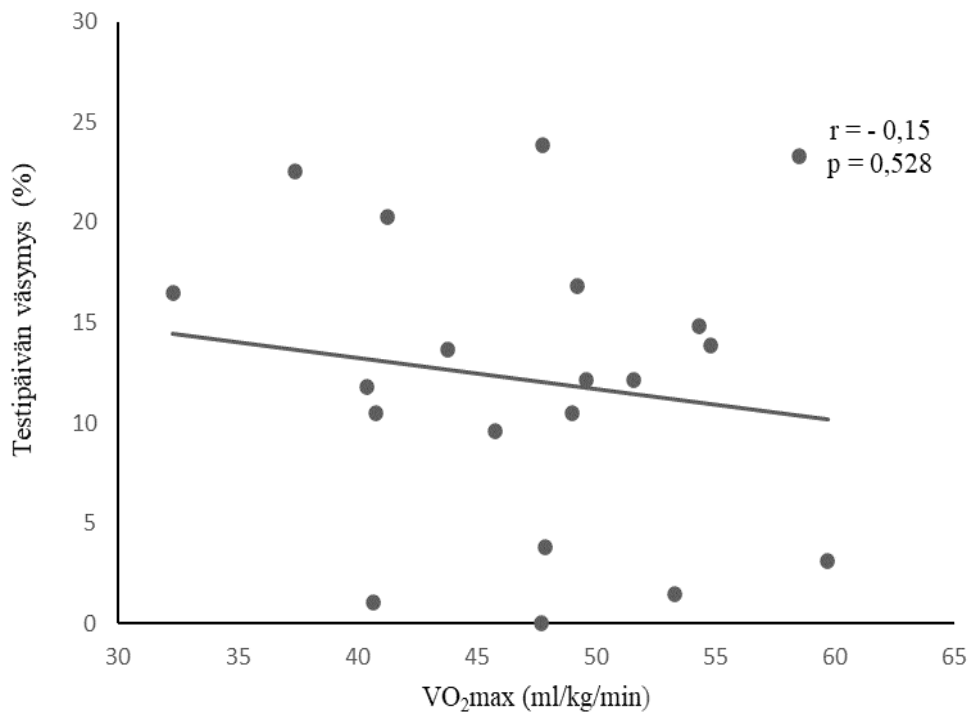


KUVA 14. VO₂max:n korrelaatio akuuttiin väsymykseen MVCV1:ssä. MVCV 1 on ilmaistu prosentteina eli kuinka paljon MVC laski prosentuaalisesti ensimmäisen P_{max}-testin seurauksena.



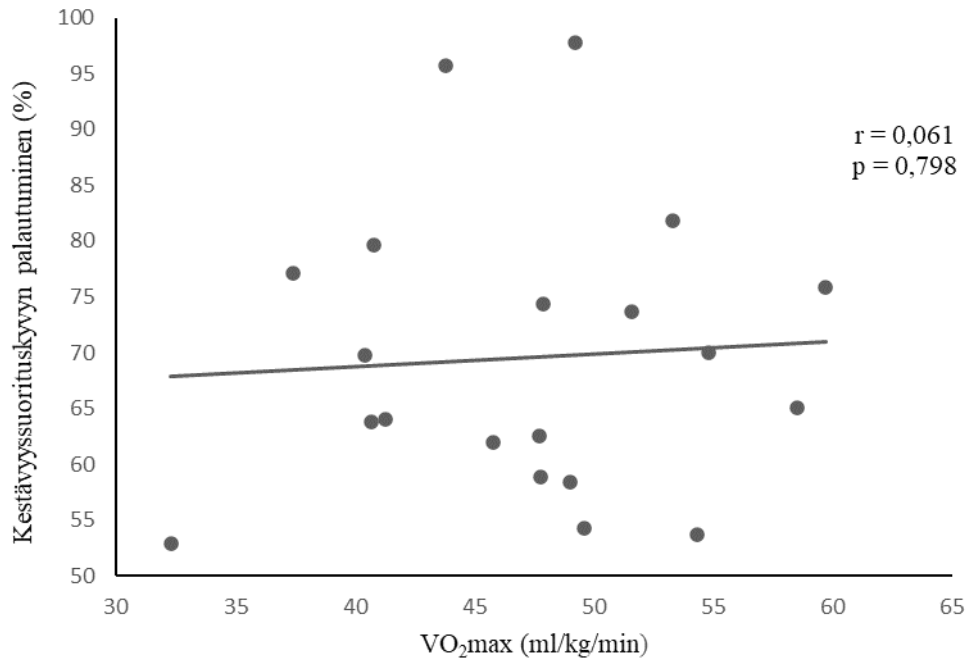
KUVA 15. CMJ-tuloksen prosentuaalisen palautumisen korrelaatio VO₂max:iin. Kuvassa 80 % palautuminen tarkoittaa, että CMJ pre2 oli 80 % CMJ pre 1:stä.

VO₂max:lla ei myöskään ollut tilastollisesti merkitsevää riippuvuutta koko testipäivän aikana kasaantuneeseen väsymykseen. VO₂max:n korrelaatio CMJ:ssä havaittuun väsymykseen testipäivän aikana näkyy kuvasta 16. Lasku CMJ:ssä oli keskimäärin 12.1 %. Myöskään MVC:n muutoksella testipäivän aikana (lasku keskimäärin 19.5 %) ei ollut tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota VO₂max:n kanssa ($r = 0.116$, $p = 0.625$).

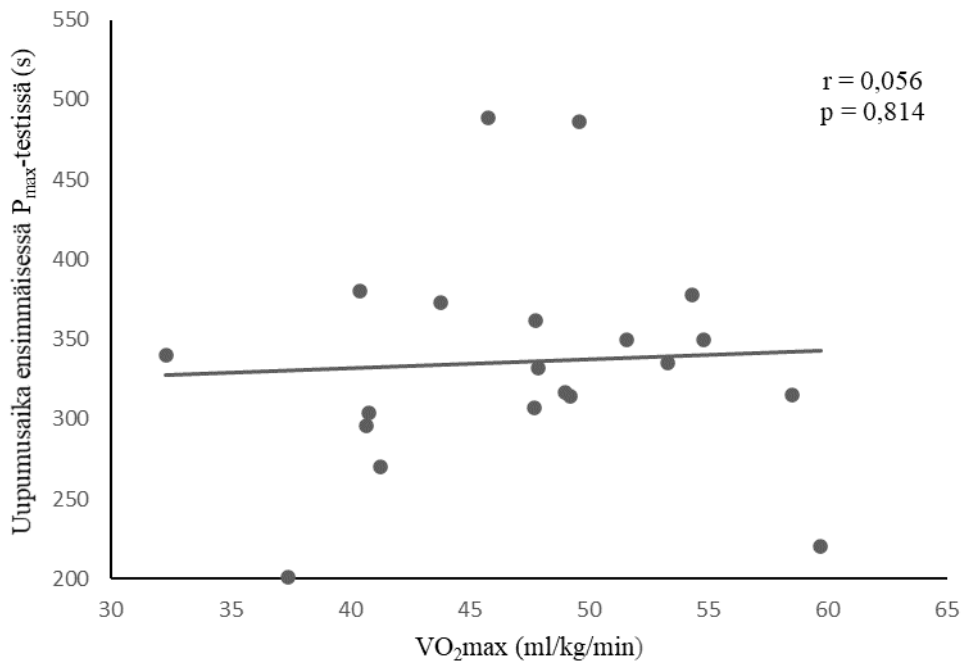


KUVA 16. VO₂max:n korrelaatio CMJ:n suhteelliseen muutokseen testipäivän aikana. Kuvassa 20 % testipäivän väsymys tarkoittaa, että CMJ oli post 3+10:ssä 20 % pienempi kuin pre1:ssä.

VO₂max:lla ei ollut tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota kestävyysuorituskyvyn palautumiseen ($p > 0,05$). Toinen T_{lim} eli toisen P_{max}-testin uupumusaika oli keskimäärin 69,6 % (+- 12,7 % ja vaihteluväli 53–98 %) ensimmäisestä T_{lim}:stä. VO₂max:n korrelaatio kestävyysuorituskyvyn palautumiseen toisesta P_{max}-testistä ensimmäiseen on esitetty kuvassa 17. VO₂max:n ja ensimmäisen P_{max}-testin T_{lim}:n välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota ($p = 0,814$). VO₂max:n ja ensimmäisen T_{lim}:n välinen riippuvuussuhde nähdään kuvasta 18.

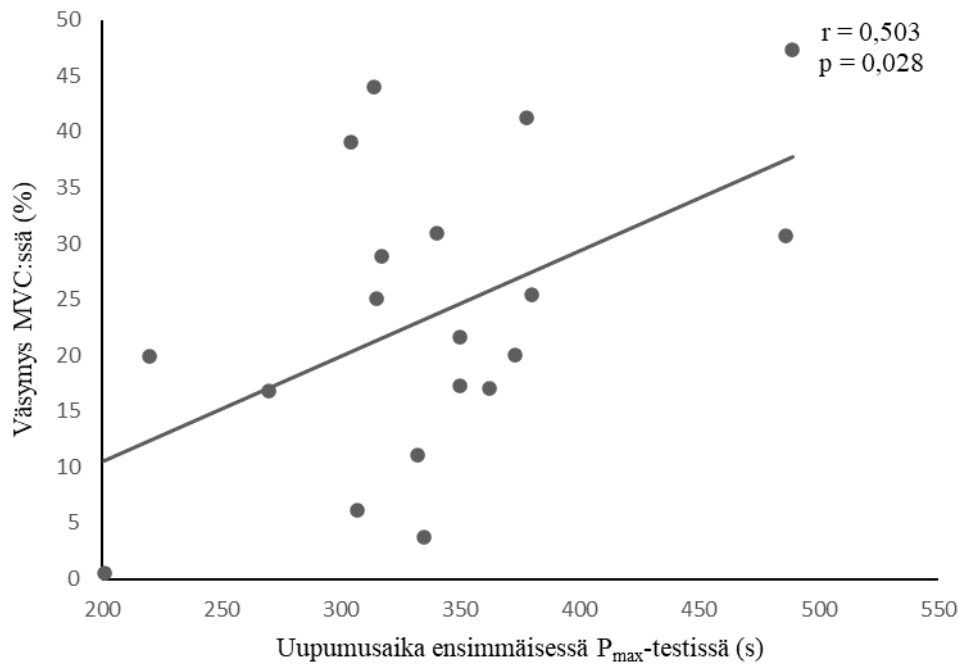


KUVA 17. $VO_2\max$:n korrelaatio kestävyysuorituskyvyn palautumiseen. Kestävyysuorituskyvyn palautuminen tarkoittaa kuvassa, että mikä oli toisen P_{\max} -testin uupumusajan prosentuaalinen osuus ensimmäisen P_{\max} -testin uupumusajasta.



KUVA 18. Ensimmäisen P_{\max} -testin uupumusajan (T_{lim}) ja $VO_2\max$:n välinen korrelaatio.

Pidempi uupumusaika ensimmäisessä P_{\max} -testissä korreloi positiivisesti suuremman MVC-väsymyksen kanssa. Tämä korrelaatio havaittiin sekä suhteellisen (kuva 19) että absoluuttisen MVC:n muutoksen kanssa ($r = 0.514$, $p = 0.024$).



KUVA 19. Korrelaatio uupumusaajan ja MVC:ssä havaitun väsymyksen välillä. Väsymys MVC:ssä kertoo kuvassa eroa pre1- ja post1 -mittausten välillä eli kuinka paljon MVC laski prosentuaalisesti ensimmäisen P_{\max} -testin seurauksena (MVCV 1).

7 POHDINTA

Tutkielmassa havaittiin hypoteesin mukaisesti, että VO_{2max} :lla ei ollut korrelaatiota ensimmäisen P_{max} -testin T_{lim} :iin. Toisaalta hypoteesien vastaisesti VO_{2max} :lla ei ollut korrelaatiota hermolihasjärjestelmän tai kestävyysuorituskyvyn palautumisen kanssa. VO_{2max} :illa ei myöskään ollut korrelaatiota välittömästi P_{max} -testien jälkeisen väsymyksen kanssa. Hermolihasjärjestelmän väsymyksessä välittömästi eri P_{max} -testien jälkeen ei havaittu eroja. Ensimmäinen T_{lim} oli pidempi kuin toinen ja kolmas T_{lim} , mutta toisen ja kolmannen T_{lim} :n välillä ei havaittu eroja.

7.1 T_{lim} ja VO_{2max}

Ensimmäisen P_{max} -testin uupumusaika eli T_{lim} ei ollut riippuvainen VO_{2max} :sta. Tämä on perusteltavissa kriittinen teho -mallilla ja P_{max} :in määritelmällä tässä tutkielmassa (suoran testin maksimiteho). T_{lim} tämän tutkielman P_{max} -testissä riippuu W' :sta, suuremman W' :n johtaessa pidempään T_{lim} :iin. W' :n vaikuttavat vuorostaan enemmän anaerobiset ominaisuudet (Poole ym. 2016), eikä sillä ole korrelaatiota VO_{2max} :n kanssa (Murgatroyd ym. 2011).

Niin ikään kriittinen teho -mallin avulla voidaan selittää se, että toisella ja kolmannella T_{lim} :illä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa. Koska P_{max} -testit tehtiin kriittisen tehon yläpuolella, W' vähenee testin aikana. Uupumuksessa W' on käytännössä katsoen nolla. 15 minuutin palautumisjakson aikana W' palautuu eli työ, jota voidaan tehdä kriittisen tehon yläpuolella, palautuu tämän jakson aikana. Työn ollessa tehon ja ajan tulo sekä tehon ollessa tietyllä koehenkilöllä vakio kaikissa P_{max} -testeissä, W' :n ja T_{lim} :n suhde on lineaarinen. Jos W' on esimerkiksi 20 kilojoulea ensimmäisessä P_{max} -testissä ja 15 kilojoulea toisessa P_{max} -testissä, kestävyysuorituskyky on palautunut 75 % eli toinen T_{lim} on ollut 75 % ensimmäisestä. Tässä tapauksessa 15 minuutin palautumisjakson aikana W' palautuisi 15 kilojoulea palautumisjakson aikana. Niinpä W' :n pitäisi palautua saman verran toisen ja kolmannen P_{max} -testin välillä. Tällöin merkittävää eroa toisessa ja kolmannessa T_{lim} :ssä havaittaisi, kun W' ja täten kestävyysuorituskyky palautuisi uupumuksen jälkeen tietyllä palautumisjaksolla tietyn määrän.

Mikäli P_{\max} -testejä toistettaisiin useammin kuin tässä tutkielmassa, T_{\lim} laskisi jossain vaiheessa. Yksi tekijä taustalla voi olla luurankolihasjen glykogeenivarastot, joiden hupeneminen aiheuttaisi väsymystä (Ortenblad ym. 2013) ja T_{\lim} :n laskua. Toisaalta tilastollisesti merkitsevän eron puute toisen ja kolmannen T_{\lim} :n välillä viittaa siihen, että glykogeenivarastot eivät rajoittaneet koehenkilöiden suorituskykyä tässä tutkielmassa. Samoin toistuvissa erittäin intensiivisissä kuormituksissa kestävyys suorituskyvyn palautuminen voi hidastua (Chorley ym. 2020; Chorley ym. 2022). Näiden tutkimusten kuormitusprotokolla (kolme suoraa testiä lyhyillä palautuksilla) oli kuitenkin kuormittavampi kuin tässä tutkielmassa.

7.2 $VO_2\max$ ja palautuminen

Kestävyys suorituskyky palautui tässä tutkielmassa noin 70 % eli toinen T_{\lim} oli noin 70 % ensimmäisestä. Tämä lukema on vertailukelpoinen joidenkin aikaisempien tutkimusten kanssa (Felippe ym. 2020; Caen ym. 2021), mutta ei kaikkien (Ferguson ym. 2010). Tutkielmassa ei kuitenkaan havaittu korrelaatiota $VO_2\max$:n ja hermolihasjärjestelmän voiman- tai tehontuoton eikä kestävyys suorituskyvyn palautumisen kanssa.

Aiemmissä tutkimuksissa (Ducrocq ym. 2020; Caen ym. 2021) $VO_2\max$ korreloi nopeamman kestävyys suorituskyvyn palautumisen kanssa tai korkeamman $VO_2\max$:n ryhmällä palautuminen oli nopeampaa kuin matalamman $VO_2\max$:n ryhmälle. Ristiriitaisille tuloksille voi olla useita potentiaalisia selityksiä, jotka liittyvät muun muassa P_{\max} -testien jälkeiseen väsymykseen, P_{\max} -testien välisiin palautumisaikoihin ja -tapaan sekä koehenkilöiden harjoittelutaustaan. Lisäksi koehenkilöiden väliset erot $VO_2\max$:ssa olivat paljon pienempiä tässä tutkielmassa kuin Ducrocqin ym. (2020) tutkimuksessa ($62,3 \pm 15,0$ ml/kg/min vs. $47,3 \pm 7,1$ ml/kg/min).

7.2.1 P_{\max} -testien jälkeinen väsymys

Tässä tutkielmassa $VO_2\max$:lla ei havaittu korrelaatiota välittömästi P_{\max} -testien jälkeisen väsymyksen kanssa. Nämäkin tulokset ovat ristiriidassa aiempien tutkimustulosten kanssa (Ferguson ym. 2016; Ducrocq ym. 2020). Mahdollisesti aiemmissä tutkimuksissa palautuminen

kuormitusta edeltävälle tasolle on voinut olla nopeampaa, koska väsymys kuormituksen jälkeen on korkean VO₂max:n henkilöillä ollut pienempää, kuten esimerkiksi Ducrocqin ym. (2020) tutkimuksessa.

Lisäksi vaikka kestävyysharjoittelu parantaakin perifeerisen väsymyksen sietokykyä vähentämällä sentraalista väsymystä samalla absoluuttisella kuormituksella (Zghal ym. 2015), kestävyysharjoittelu ei näyttäisi parantavan väsymyksen sietokykyä uupumukseen asti tehdyssä kuormituksessa (Mira ym. 2018). Täten uupumukseen asti tehdyissä P_{max}-testeissä, väsymys välittömästi kuormituksen jälkeen ei välttämättä olisi suoraan riippuvainen kestävyysharjoittelutaustasta tai VO₂max:sta. Intensiivisen kuormituksen jälkeinen väsymys saattaa olla enemmän riippuvainen lihassolutyypijakaumasta (Lievens ym. 2020). Mahdollisesti tässä tutkielmassa lihassolutyypijakaumassa ei ollut merkittäviä eroja korkeamman ja matalamman VO₂max:n koehenkilöiden välillä. Irtiottokyvyn ja aerobisen kestävyuden tai kestävyysharjoittelun välisestä kausaalisuhteesta tarvitaan kuitenkin lisää tutkimusta.

7.2.2 Palautumisaika ja -tapa sekä luurankolihasjen oksidatiivinen kapasiteetti

Kuten aiemmin mainittu, VO₂max:n ja nopeamman palautumisen välinen riippuvuussuhde voi olla ainakin osittain seurausta epäsuorista tekijöistä. Fosfokreatiinin uudelleensynteesi on riippuvainen mitokondrioiden oksidatiivisesta kapasiteetista (Heskamp ym. 2021) ja fosfokreatiinin uudelleensynteesin on havaittu olevan nopeampaa henkilöillä, joilla on korkea VO₂max (Layec ym. 2016). Tietyn rajan jälkeen korkeampi VO₂max ei kuitenkaan välttämättä korreloi yhtä selkeästi fosfokreatiinitasojen palautumisen kanssa (Cooke ym. 1997). Cooken ym. (1997) tutkimuksessa fosfokreatiinitasojen palautuminen intensiivisen kuormituksen jälkeen oli yhtä nopeaa 46 ml/kg/min ja 64 ml/kg/min VO₂max:n ryhmissä. Tässä tutkielmassa VO₂max oli keskimäärin 47 ml/kg/min. Mahdollisesti tämän tutkielman koehenkilöillä ei ollut selkeää korrelaatiota VO₂max:lla ja mitokondrioiden oksidatiivisen kapasiteetilla.

Samoin palautumisaika tässä tutkielmassa (10 minuuttia hermolihasjärjestelmän testien välissä, 15 minuuttia P_{max}-testeissä) saattoi olla niin pitkä, että myös matalamman oksidatiivisen kapasiteetin koehenkilöillä fosfokreatiinitasot ehtivät palautua riittävän lähelle lepotasoa. Esimerkiksi Chidnokin ym. (2013c) tutkimuksessa fosfokreatiinitasot olivat palautuneet lähes

lepotasolle 10 minuuttia intensiivisen kuormituksen jälkeen. Lisäksi korkeammasta $VO_2\text{max}$:sta ja minuuttitulavuudesta ei välttämättä tässä tutkielmassa ollut palautumista ajatellen hyötyä, johtuen pitkistä palautumisjaksoista. Aktiivisissa lihassoluissa pH voi palautua intensiivisen kuormituksen jälkeen kuormitusta edeltävälle tasolle jo 10–15 minuutissa (Hug ym. 2006; Chidnok ym. 2013c). Palautumisjaksot saattoivatkin olla tässä tutkielmassa riittävän pitkiä aineenvaihduntatuotteiden poistamiseen myös matalamman $VO_2\text{max}$:n henkilöillä.

Toisaalta Caenin ym. (2021) tutkimuksessa korkeampi $VO_2\text{max}$ korreloi nopeamman kestävyysuorituskyvyn palautumisen kanssa, vaikka palautumisaika kestävyyskuormitusten välillä oli 15 minuuttia. Selkeä ero Caenin ym. (2021) ja tämän tutkielman välillä oli kuitenkin palautumistapa kestävyyskuormitusten välissä. Tässä tutkielmassa koehenkilöt palautuivat passiivisesti istuen, kun taas Caenin ym. (2021) tutkimuksessa palautuminen tehtiin polkupyöräergometrillä aktiivisesti teholla, joka oli hieman alle aerobisen kynnyksen. Aktiivinen palautuminen aerobisen kynnyksen paikkeilla kasvattaa hapenkulutusta suhteessa hapenkuljetukseen eikä aktiivisen lihaksen hemoglobiinin happisaturaatio palaudu yhtä nopeasti aktiivisessa kuin passiivisessa palautumisessa (Fennell & Hopker 2021). Rajoitteet hapenkuljetuksessa suhteessa hapenkulutukseen saattavat heikentää suorituskkyä toistuvissa intensiivisissä kuormituksissa esimerkiksi hidastamalla fosfokreatiinin uudelleensynteesiä (Fennell & Hopker 2021).

Erot $VO_2\text{max}$:n ja palautumisen riippuvuussuhteessa tämän tutkielman ja Caenin ym. (2021) tutkimuksen välillä saattavatkin liittyä eroihin palautumistavassa. Aktiivisen palautuksen hidastaessa esimerkiksi fosfokreatiinin uudelleensynteesiä, aerobisten ominaisuuksien merkitys palautumisessa saattavat olla suurempi aktiivisessa palautumisessa. Toisaalta Fennellin ja Hopkerin (2021) tutkimuksessa alhaisempi aktiivisen lihaksen hemoglobiinin happisaturaatio aktiivisessa palautumisessa havaittiin neljän minuutin palautumisjaksoilla. On epäselvää, havaittaisiinko tätä myös pidemmällä (10–15 minuutin) palautumisjaksoilla.

7.2.3 Harjoittelutausta ja sarkoplasmisen retikulumin kalsiumin käsittely

$VO_2\text{max}$:n ja nopeamman palautumisen välinen korrelaation puute saattaa liittyä myös koehenkilöiden harjoittelutaustaan, joka vuorostaan voi olla linkittynyt sarkoplasmisen

retikulumin (SR) kalsiumin käsittelyyn. Rajoitteet kalsiumin vapautumisesta SR:stä ovat yksi merkittävimmistä lihasväsymystä aiheuttavista tekijöistä (Cheng ym. 2018). Suurempi tyyppin II lihassolujen osuus ja irtiottokyky korreloivat suuremman intensiivisen kuormituksen aiheuttaman SR:n kalsiumin käsittelyn laskun kanssa (Li ym. 2002). SR:n kalsiumin käsittelyn palautumiseen voi vuorostaan mennä yli 45 minuuttia intensiivisen, lyhytkestoisen (4 min) kuormituksen jälkeen (Gejl ym. 2020).

Kestävyysharjoittelulla voidaan parantaa SR:n kalsiumin käsittelyä (Gejl ym. 2020). Pääosin matalatehoinen kestävyysharjoittelu ei kuitenkaan näyttäisi olevan ainoa harjoittelumuoto, jolla voidaan parantaa SR:n kalsiumin käsittelyä. Sitä voidaan parantaa myös nopeuskestävyysharjoittelulla, mutta samalla VO₂max:ssa ei välttämättä tapahdu muutosta (Ortenblad ym. 2000; Skovgaard ym. 2017). Lisäksi voimaharjoittelulla voidaan parantaa SR:n kalsiumin käsittelyä (Green ym. 1998; Munkvik ym. 2010).

Greenin ym. (1998) tutkimuksessa voimaharjoittelu vähensi kestävyyskuormituksen aiheuttamaa Ca²⁺-ATPaasin aktiivisuuden laskua. Tämä entsyymi katalysoi kalsiumin pumppaamista takaisin SR:ään lihassupistuksen jälkeen (Green ym. 2003). Niinpä kestävyyskuormitus ei aiheuta yhtä suurta laskua SR:n kalsiumin käsittelyssä voimaharjoittelun jälkeen, mikä voisi teoriassa johtaa nopeampaan palautumiseen. Toisaalta Greenin ym. (1998) tutkimuksessa kestävyyskuormitus tehtiin samalla absoluuttisella submaksimaalisella teholla ja on epäselvää, että havaittaisiinko samaa myös uupumukseen tehtävän kuormituksen jälkeen.

Kaiken kaikkiaan näyttäisi siltä, että SR:n kalsiumin käsittelyä voidaan tehostaa useilla eri harjoittelumuodoilla. Näistä nopeuskestävyysharjoittelu (Ortenblad ym. 2000) ja voimaharjoittelu (Farup ym. 2012) eivät välttämättä kasvata VO₂max:ia. Mahdollisesti tämän tutkielman matalan VO₂max:n koehenkilöt olivat parantaneet SR:n kalsiumin käsittelyä voima- ja/tai nopeuskestävyysharjoittelulla, eikä täten korrelaatiota VO₂max:n ja palautumisen välillä havaittu. Niinpä erilaisella harjoittelutaustalla voidaan ehkä myös selittää erot VO₂max:n ja palautumisen välisessä korrelaatioissa tämän tutkielman sekä aiempien tutkimusten välillä.

Tämä selitys ei kuitenkaan ole aukoton, koska tarkkaa tietoa tämän tutkielman tai esimerkiksi Caenin ym. (2021) tutkimuksen koehenkilöiden harjoittelutaustasta ei ole. Lisäksi Lin ym. (2002) tutkimuksessa intensiivisen kuormituksen jälkeen SR:n kalsiumin käsittelyssä ei havaittu eroja harjoittelemattomien ja voima- tai kestävyysharjoitteluiden koehenkilöiden välillä. Huomioitavaa on myös se, että Gejlin ym. (2020) tutkimuksessa intensiivisen

kuormituksen aiheuttama lasku kalsiumin vapautumisesta SR:stä ei vaikuttanut suorituskykyyn toistuvissa intensiivisissä kuormituksissa. Kuormitus (1300 metrin rullahiihto) ei välttämättä ollut riittävän intensiivinen, jotta rajoitteet SR:n kalsiumin käsittelyssä olisivat heikentäneet suorituskykyä (Gejl ym. 2020). Toinen mahdollisuus on, että sitä kompensoitiin muilla mekanismeilla, kuten parantuneella myofibrillien kalsiumherkkyydellä (Gejl ym. 2020). Selkeästi lisää tutkimusta aiheesta tarvitaan.

7.3 Tutkielman vahvuudet ja heikkoudet

Vakiointia voi pitää tämän tutkielman vahvuutena ja heikkoutena. Väsymystä aiheuttavana kuormituksena oli kaikilla koehenkilöillä suoran testin maksimiteholla tehty P_{\max} -testit, jotka tehtiin uupumukseen asti. Lisäksi palautumisajat P_{\max} -testien välillä oli vakioitu. Tosin lämmittely ei välttämättä ollut optimaalinen suorituskykyä ajatellen ensimmäisissä hermolihasjärjestelmän testeissä. Spesifisen lämmittelyn (lämmittely samalla kuormitustavalla kuin itse suoritus) on havaittu parantavan suorituskykyä muun muassa huipputehontuoton suhteen verrattuna yleiseen lämmittelyyn (Barnes ym. 2017). Tässä tutkielmassa koehenkilöt eivät saaneet tehdä spesifistä lämmittelyä MVC:tä varten. Tämä saattoi olla yksi tekijä, jonka takia joissain mittauksissa pari koehenkilöä saivat paremmat tulokset P_{\max} -testien jälkeisissä MVC-mittauksissa kuin niitä edeltävissä.

Samoin lämmittely ennen P_{\max} -testejä ei välttämättä ollut riittävä. Koehenkilöt tekivät ennen ensimmäistä P_{\max} -testiä polkupyöräergometrillä lämmittelyn, joka koostui kolmen minuutin kuormituksesta 70 % P_{\max} :sta ja kahdesta 30 sekunnin vedosta P_{\max} :lla. Tämä täyttää kohtalaisen hyvin esimerkiksi McGowanin ym. (2015) kriteerit lämmittelylle ennen korkean intensiteetin kuormitusta. Tosin hapenoton kinetiikan parantumisen ja kestävyys suorituskyvyn optimoinnin suhteen toimivaksi havaittu valmistava kuormitus on ollut kuusi minuuttia aerobisen kynnyksen ja $VO_2\max$:n puolivälissä (Jones ym. 2003) tai hieman korkeammalla teholla (Bailey ym. 2009). Niinpä on epäselvää, oliko tutkielmassa käytetty lämmittely riittävä optimoimaan suorituskykyä ensimmäisessä P_{\max} -testissä.

Lisäksi palautumisaika lämmittelystä ennen ensimmäistä P_{\max} -testiä saattoi olla liian lyhyt. Esimerkiksi lämmittelyn jälkeisen palautumisajan ollessa 20 minuuttia suorituskyky paranee enemmän, kuin jos palautumisaika on 9 minuuttia (Bailey ym. 2009). Tässä tutkielmassa

palautumisaika lämmittelyn ja P_{\max} -testin välissä oli todennäköisesti lähempänä 9 minuuttia. Palautumisaikaa lämmittelyn ja P_{\max} -testien välissä ei myöskään oltu vakioitu.

Myöskään väsymystä aiheuttavien kuormitusten (P_{\max} -testit) kestoja ei vakioitu tässä tutkielmassa. Tässä tutkielmassa pidemmällä T_{\lim} :llä ja suuremmalla prosentuaalisella laskulla MVC:ssä oli tilastollisesti merkitsevä riippuvuussuhde. Toisin sanoen koehenkilöt, joiden uupumusaika suoran testin maksimiteholla tehtävässä testissä oli pidempi, olivat väsyneempiä välittömästi testin jälkeen. Selitys tähän saattaa liittyä muun muassa sentraaliseen väsymykseen, joka kasvaa kuormituksen keston pidentyessä (Thomas ym. 2016). Pidemmän uupumukseen asti tehtävän kuormituksen keston ja suuremman kuormituksen jälkeisen väsymyksen välinen riippuvuussuhde on löydetty myös muissa tutkimuksissa (Caen ym. 2019). Toisaalta koska $VO_{2\max}$:lla ei ollut riippuvuussuhdetta T_{\lim} :n kanssa, suurempi väsymys pidemmän T_{\lim} :n jälkeen ei todennäköisesti vaikuttanut $VO_{2\max}$:n ja palautumisen väliseen riippuvuussuhteeseen tässä tutkielmassa. Joka tapauksessa tulevaisuudessa väsymystä tai palautumista tutkittaessa, testit tulisi pyrkiä vakioimaan mahdollisimman hyvin (esimerkiksi kriittinen teho -mallin avulla), jotta potentiaalisilta virhelähteiltä vältyttäisiin.

Välittömästi P_{\max} -testien jälkeinen väsymys oli tässä tutkielmassa suurempaa kuin mitä monissa muissa tutkimuksissa on havaittu (Neyroud ym. 2016; Thomas ym. 2016), mutta ei kaikissa (Mira ym. 2020). Tämä viittaa koehenkilöiden hyvään irtiottokykyyn ja motivaation, mitä voi pitää vahvuutena tässä tutkielmassa. Toisaalta tämän tutkielman koehenkilöt (kamppailulajien urheilijat) ovat myös osittain heikkous tässä tutkielmassa. Suora testi ja P_{\max} -testit tehtiin tässä tutkielmassa pyöräillen. Painin kilpailumenestyksessä ylävartalon maksimivoimalla ja anaerobisilla ominaisuuksilla onkin tärkeä rooli (Garcia-Pallares ym. 2011; Nikooie ym. 2017). Sen sijaan pyöräilyssä ylävartalon maksimivoimalla ja anaerobisilla ominaisuuksilla ei ole suurta merkitystä. Lisäksi tässä tutkielmassa oli koehenkilöitä useista eri kamppailulajeista, joissa lajivaatimukset eroavat muun muassa ylä- ja alavartalon voimantuoton suhteen. Ylävartalon lihasmassa pienentää painokiloon suhteutettua $VO_{2\max}$:a, mutta ei vaikuta merkittävästi hapenkuljetuskapasiteettiin pyöräilyssä aktiivisille lihaksille. On epäselvää, olisivatko tutkielman tulokset olleet samankaltaisia harjoittelutaustaltaan homogeenisemmällä ryhmällä.

7.4 Johtopäätökset ja yhteenveto

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että $VO_2\text{max}$:lla ei ollut korrelaatiota hermolihäsjärjestelmän palautumiseen intensiivisen kestävyyskuormituksen jälkeen, palautusjaksojen ollessa 10 minuuttia. Myöskään kestävyys suorituskyvyn palautumisella 15 minuutin palautumisjaksolla ei ollut korrelaatiota $VO_2\text{max}$:n kanssa. Tulokset viittaavat siihen, että $VO_2\text{max}$ ei suoraan nopeuttaisi palautumista pidemmällä (10–15 minuutin) palautumisjaksoilla.

Tämän tutkielman tulokset ovat osittain ristiriitaisia aiempien aiheesta tehtyjen tutkimustulosten kanssa. Selitys tähän saattaa löytyä muun muassa tutkimusmetodologisista eroista, esimerkiksi palautumisjaksojen pituudessa ja koehenkilöiden harjoitustaustassa. $VO_2\text{max}$:n merkitys palautumisessa saattaa olla suurempi lyhemmillä palautumisjaksoilla. Lisätutkimusta $VO_2\text{max}$:n ja muiden tekijöiden merkityksestä hermolihäsjärjestelmän sekä kestävyys suorituskyvyn palautumisessa kuitenkin vielä tarvitaan.

Hypoteesin mukaisesti $VO_2\text{max}$:lla ei ollut korrelaatiota T_{lim} :iin. Tämä on selitettävissä muun muassa P_{max} :n määrittävällä (suoran testin maksimiteho) ja kriittinen teho -mallilla. Lisäksi tässä tutkielmassa $VO_2\text{max}$ ei korreloinut pienemmän väsymyksen kanssa uupumuksessa, toisin kuin aiemmissa tutkimuksissa on havaittu. Tämä viittaa siihen, että korkea $VO_2\text{max}$ ei suoraan johda pienempään väsymykseen intensiivisessä kuormituksessa. Välittömästi intensiivisen kuormituksen jälkeistä väsymystä ja palautumista saattavatkin selittää muut tekijät kuin $VO_2\text{max}$ tai siihen liittyvät adaptaatiot.

LÄHTEET

- Adami, A., Sivieri, A., Moia, C., Perini, R. & Ferretti, G. (2013). Effects of step duration in incremental ramp protocols on peak power and maximal oxygen consumption. *European Journal of Applied Physiology* 113 (10), 2647–2653. doi:10.1007/s00421-013-2705-9.
- Amann, M. (2011). Central and peripheral fatigue: interaction during cycling exercise in humans. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 43 (11), 2039–2045. doi:10.1249/MSS.0b013e31821f59ab.
- Bailey, S. J., Vanhatalo, A., Wilkerson, D. P., Dimenna, F. J. & Jones, A. M. (2009). Optimizing the "priming" effect: influence of prior exercise intensity and recovery duration on O₂ uptake kinetics and severe-intensity exercise tolerance. *Journal of Applied Physiology* 107 (6), 1743–1756. doi:10.1152/jappphysiol.00810.2009.
- Barnes, M. J., Petterson, A. & Cochrane, D. J. (2017). Effects of different warm-up modalities on power output during the high pull. *Journal of sports sciences* 35 (10), 976–981. doi:10.1080/02640414.2016.1206665.
- Barstow, T. J., Jones, A. M., Nguyen, P. H. & Casaburi, R. (1996). Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *Journal of Applied Physiology* 81 (4), 1642–1650. doi:10.1152/jappl.1996.81.4.1642.
- Barstow, T. J. & Mole, P. A. (1991). Linear and nonlinear characteristics of oxygen uptake kinetics during heavy exercise. *Journal of Applied Physiology* 71 (6), 2099–2106. doi:10.1152/jappl.1991.71.6.2099.
- Bassett, D. R. & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 32(1), 70–84. doi:10.1097/00005768-200001000-00012.
- Bentley, D. J. & McNaughton, L. R. (2003). Comparison of W(peak), VO₂(peak) and the ventilation threshold from two different incremental exercise tests: relationship to endurance performance. *Journal of Science and Medicine in Sport* 6 (4), 422–435. doi:10.1016/s1440-2440(03)80268-2.
- Bertuzzi, R., Nascimento, E. M., Urso, R. P., Damasceno, M. & Lima-Silva, A. E. (2013). Energy system contributions during incremental exercise test. *Journal of Sports Science & Medicine* 12 (3), 454–460.
- Billat, L. V. (2001). Interval training for performance: a scientific and empirical practice. Special recommendations for middle- and long-distance running. Part II: anaerobic

- interval training. *Sports Medicine* 31 (2), 75–90. doi:10.2165/00007256-200131020-00001.
- Billat, V., Bernard, O., Pinoteau, J., Petit, B. & Koralsztein, J. P. (1994a). Time to exhaustion at VO₂max and lactate steady state velocity in sub elite long-distance runners. *Archives Internationales De Physiologie, De Biochimie Et De Biophysique* 102 (3), 215–219. doi:10.3109/13813459409007541.
- Billat, V., Faina, M., Sardella, F., Marini, C., Fanton, F., Lupo, S., Faccini, P., de Angelis, M., Koralsztein, J. P. & Dalmonte, A. (1996). A comparison of time to exhaustion at VO₂ max in elite cyclists, kayak paddlers, swimmers and runners. *Ergonomics* 39 (2), 267–277. doi:10.1080/00140139608964457.
- Billat, V., Petot, H., Karp, J. R., Sarre, G., Morton, R. H. & Mille-Hamard, L. (2013). The sustainability of VO₂max: effect of decreasing the workload. *European Journal of Applied Physiology* 113 (2), 385–394. doi:10.1007/s00421-012-2424-7.
- Billat, V., Renoux, J. C., Pinoteau, J., Petit, B. & Koralsztein, J. P. (1994b). Times to exhaustion at 100 % of velocity at VO₂max and modelling of the time-limit/velocity relationship in elite long-distance runners. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 69 (3), 271–273. doi:10.1007/BF01094801.
- Bishop, D., Jenkins, D. G. & Mackinnon, L. T. (1998). The effect of stage duration on the calculation of peak VO₂ during cycle ergometry. *Journal of Science and Medicine in Sport* 1 (3), 171–178. doi:10.1016/s1440-2440(98)80012-1.
- Black, M. I., Durant, J., Jones, A. M. & Vanhatalo, A. (2014). Critical power derived from a 3-min all-out test predicts 16.1-km road time-trial performance. *European Journal of Sport Science* 14 (3), 217–223. doi:10.1080/17461391.2013.810306.
- Black, M. I., Jones, A. M., Blackwell, J. R., Bailey, S. J., Wylie, L. J., McDonagh, S. T., Thompson, C., Kelly, J., Sumners, P., Mileva, K. N., Bowtell, J. L. & Vanhatalo, A. (2017). Muscle metabolic and neuromuscular determinants of fatigue during cycling in different exercise intensity domains. *Journal of Applied Physiology* 122 (3), 446–459. doi:10.1152/jappphysiol.00942.2016.
- Black, M. I., Jones, A. M., Kelly, J. A., Bailey, S. J. & Vanhatalo, A. (2016). The constant work rate critical power protocol overestimates ramp incremental exercise performance. *European Journal of Applied Physiology* 116 (11–12), 2415–2422. doi:10.1007/s00421-016-3491-y.
- Blondel, N., Berthoin, S., Billat, V. & Lensel, G. (2001). Relationship between run times to exhaustion at 90, 100, 120, and 140 % of vVO₂max and velocity expressed relatively

- to critical velocity and maximal velocity. *International Journal of Sports Medicine* 22 (1), 27–33. doi:10.1055/s-2001-11357.
- Bosquet, L., Larrouturou, M., Lheureux, O. & Carter, H. (2011). VO₂ slow component is independent from critical power. *International Journal of Sports Medicine* 32 (9), 693–697. doi:10.1055/s-0031-1275358.
- Burnley, M., Davison, G. & Baker, J. R. (2011). Effects of priming exercise on VO₂ kinetics and the power-duration relationship. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 43 (11), 2171–2179. doi:10.1249/MSS.0b013e31821ff26d.
- Caen, K., Bourgois, G., Dauwe, C., Blancquaert, L., Vermeire, K., Lievens, E., VAN Dorpe, J. O., Derave, W., Bourgois, J. G., Pringels, L. & Boone, J. (2021). W' recovery kinetics following exhaustion: a two-phase exponential process influenced by aerobic fitness. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 53 (9), 1911–1921. doi:10.1249/MSS.0000000000002673.
- Caen, K., Bourgois, J. G., Bourgois, G., VAN DER Stede, T., Vermeire, K. & Boone, J. (2019). The reconstitution of W' depends on both work and recovery characteristics. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 51 (8), 1745–1751. doi:10.1249/MSS.0000000000001968.
- Caputo, F. & Denadai, B. S. (2004). Effects of aerobic endurance training status and specificity on oxygen uptake kinetics during maximal exercise. *European Journal of Applied Physiology* 93 (1–2), 87–95. doi:10.1007/s00421-004-1169-3.
- Caputo, F. & Denadai, B. S. (2006). Exercise mode affects the time to achieve VO₂max without influencing maximal exercise time at the intensity associated with VO₂max in triathletes. *International Journal of Sports Medicine* 27 (10), 798–803. doi:10.1055/s-2005-872962.
- Caputo, F., Mello, M. T. & Denadai, B. S. (2003). Oxygen uptake kinetics and time to exhaustion in cycling and running: a comparison between trained and untrained subjects. *Archives of Physiology and Biochemistry* 111 (5), 461–466. doi:10.3109/13813450312331342337.
- Carroll, T. J., Taylor, J. L. & Gandevia, S. C. (2017). Recovery of central and peripheral neuromuscular fatigue after exercise. *Journal of Applied Physiology* 122 (5), 1068–1076. doi:10.1152/jappphysiol.00775.2016.
- Carter, H., Jones, A. M., Barstow, T. J., Burnley, M., Williams, C. & Doust, J. H. (2000). Effect of endurance training on oxygen uptake kinetics during treadmill running. *Journal of Applied Physiology* 89 (5), 1744–1752. doi:10.1152/jappl.2000.89.5.1744.

- Cheng, A. J., Place, N. & Westerblad, H. (2018). Molecular Basis for Exercise-Induced Fatigue: The Importance of Strictly Controlled Cellular Ca²⁺ Handling. *Cold Spring Harbor perspectives in medicine* 8 (2), a029710. doi:10.1101/cshperspect.a029710.
- Chidnok, W., Dimenna, F. J., Bailey, S. J., Wilkerson, D. P., Vanhatalo, A. & Jones, A. M. (2013a). Effects of pacing strategy on work done above critical power during high-intensity exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 45 (7), 1377–1385. doi:10.1249/MSS.0b013e3182860325.
- Chidnok, W., DiMenna, F. J., Fulford, J., Bailey, S. J., Skiba, P. F., Vanhatalo, A. & Jones, A. M. (2013b). Muscle metabolic responses during high-intensity intermittent exercise measured by (31)P-MRS: relationship to the critical power concept. *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 305 (9), 1085. doi:10.1152/ajpregu.00406.2013.
- Chidnok, W., Fulford, J., Bailey, S. J., Dimenna, F. J., Skiba, P. F., Vanhatalo, A. & Jones, A. M. (2013c). Muscle metabolic determinants of exercise tolerance following exhaustion: relationship to the "critical power". *Journal of Applied Physiology* 115 (2), 243–250. doi:10.1152/jappphysiol.00334.2013.
- Chorley, A., Bott, R. P., Marwood, S. & Lamb, K. L. (2020). Physiological and anthropometric determinants of critical power, W' and the reconstitution of W' in trained and untrained male cyclists. *European Journal of Applied Physiology* 120 (11), 2349–2359. doi:10.1007/s00421-020-04459-6.
- Chorley, A., Bott, R. P., Marwood, S. & Lamb, K. L. (2022). Bi-exponential modelling of [Formula: see text] reconstitution kinetics in trained cyclists. *European journal of applied physiology* 122 (3), 677–689. doi:10.1007/s00421-021-04874-3.
- Coakley, S. L. & Passfield, L. (2018). Cycling performance is superior for time-to-exhaustion versus time-trial in endurance laboratory tests. *Journal of Sports Sciences* 36 (11), 1228–1234. doi:10.1080/02640414.2017.1368691.
- Coats, E. M., Rossiter, H. B., Day, J. R., Miura, A., Fukuba, Y. & Whipp, B. J. (2003). Intensity-dependent tolerance to exercise after attaining V(O₂) max in humans. *Journal of Applied Physiology* 95 (2), 483–490. doi:10.1152/jappphysiol.01142.2002.
- Coelho, A. C., Cannon, D. T., Cao, R., Porszasz, J., Casaburi, R., Knorst, M. M. & Rossiter, H. B. (2015). Instantaneous quantification of skeletal muscle activation, power production, and fatigue during cycle ergometry. *Journal of Applied Physiology* 118 (5), 646–654. doi:10.1152/jappphysiol.00948.2014.

- Colosio, A. L., Caen, K., Bourgois, J. G., Boone, J. & Pogliaghi, S. (2020). Bioenergetics of the VO₂ slow component between exercise intensity domains. *Pflügers Archiv : European Journal of Physiology* 472 (10), 1447-1456. doi:10.1007/s00424-020-02437-7.
- Cooke, S. R., Petersen, S. R. & Quinney, H. A. (1997). The influence of maximal aerobic power on recovery of skeletal muscle following anaerobic exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 75 (6), 512–519. doi:10.1007/s004210050197.
- Damasceno, M. V., Pasqua, L. A., Lima-Silva, A. E. & Bertuzzi, R. (2015). Energy system contribution in a maximal incremental test: correlations with pacing and overall performance in a 10-km running trial. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research* 48 (11), 1048–1054. doi:10.1590/1414-431X20154787.
- Davies, M. J., Lyall, G. K., Benson, A. P., Cannon, D. T., Birch, K. M., Rossiter, H. B. & Ferguson, C. (2021). Power Reserve at Intolerance in Ramp-Incremental Exercise Is Dependent on Incrementation Rate. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 53 (8), 1606–1614. doi:10.1249/MSS.0000000000002645.
- de Souza, K. M., Dekerle, J., Salvador, P. C., de Lucas, R. D., Guglielmo, L. G., Greco, C. C. & Denadai, B. S. (2016). Rate of utilization of a given fraction of W' (the curvature constant of the power-duration relationship) does not affect fatigue during severe-intensity exercise. *Experimental Physiology* 101 (4), 540–548. doi:10.1113/EP085451.
- Dekerle, J., de Souza, K. M., de Lucas, R. D., Guglielmo, L. G., Greco, C. C. & Denadai, B. S. (2015). Exercise tolerance can be enhanced through a change in work rate within the severe intensity domain: Work above critical power is not constant. *PloS One* 10 (9), e0138428. doi: 10.1371/journal.pone.0138428.
- Demarle, A. P., Heugas, A. M., Slawinski, J. J., Tricot, V. M., Koralsztejn, J. P. & Billat, V. L. (2003). Whichever the initial training status, any increase in velocity at lactate threshold appears as a major factor in improved time to exhaustion at the same severe velocity after training. *Archives of Physiology and Biochemistry* 111 (2), 167–176. doi:10.1076/apab.111.2.167.14003.
- do Nascimento Salvador, P C, de Lucas, R. D., Schafer, L., Guglielmo, L. G. A., Grassi, B. & Denadai, B. S. (2021). Modeling the depletion and reconstitution of W': Effects of prior exercise on cycling tolerance. *Respiratory Physiology & Neurobiology* 285, 103590. doi:10.1016/j.resp.2020.103590.

- Ducrocq, G. P., Hureau, T. J., Bøgseth, T., Meste, O. & Blain, G. M. (2021). Recovery from Fatigue after Cycling Time Trials in Elite Endurance Athletes. *Medicine and science in sports and exercise* 53 (5), 904–917. doi:10.1249/MSS.0000000000002557.
- Essen, B., Jansson, E., Henriksson, J., Taylor, A. W. & Saltin, B. (1975). Metabolic characteristics of fibre types in human skeletal muscle. *Acta Physiologica Scandinavica* 95 (2), 153–165. doi:10.1111/j.1748-1716.1975.tb10038.x.
- Evertsen, F., Medbo, J. I. & Bonen, A. (2001). Effect of training intensity on muscle lactate transporters and lactate threshold of cross-country skiers. *Acta Physiologica Scandinavica* 173 (2), 195–205. doi: 10.1046/j.1365-201X.2001.00871.x.
- Faina, M., Billat, V., Squadrone, R., De Angelis, M., Koralsztejn, J. P. & Dal Monte, A. (1997). Anaerobic contribution to the time to exhaustion at the minimal exercise intensity at which maximal oxygen uptake occurs in elite cyclists, kayakists and swimmers. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 76 (1), 13–20. doi:10.1007/s004210050207.
- Farup, J., Kjølhede, T., Sørensen, H., Dalgas, U., Møller, A. B., Vestergaard, P. F., Ringgaard, S., Bojsen-Møller, J. & Vissing, K. (2012). Muscle morphological and strength adaptations to endurance vs. resistance training. *Journal of strength and conditioning research* 26 (2), 398–407. doi:10.1519/JSC.0b013e318225a26f.
- Felippe, L. C., Melo, T. G., Silva-Cavalcante, M. D., Ferreira, G. A., Boari, D., Bertuzzi, R. & Lima-Silva, A. E. (2020). Relationship between recovery of neuromuscular function and subsequent capacity to work above critical power. *European Journal of Applied Physiology* 120 (6), 1237–1249. doi:10.1007/s00421-020-04338-0.
- Fennell, C. & Hopker, J. G. (2021). The acute physiological and perceptual effects of recovery interval intensity during cycling-based high-intensity interval training. *European journal of applied physiology* 121 (2), 425–434. doi:10.1007/s00421-020-04535-x.
- Ferguson, C., Rossiter, H. B., Whipp, B. J., Cathcart, A. J., Murgatroyd, S. R. & Ward, S. A. (2010). Effect of recovery duration from prior exhaustive exercise on the parameters of the power-duration relationship. *Journal of Applied Physiology* 108 (4), 866–874. doi:10.1152/jappphysiol.91425.2008.
- Ferguson, C., Whipp, B. J., Cathcart, A. J., Rossiter, H. B., Turner, A. P. & Ward, S. A. (2007). Effects of prior very-heavy intensity exercise on indices of aerobic function and high-intensity exercise tolerance. *Journal of Applied Physiology* 103 (3), 812–822. doi: 10.1152/jappphysiol.01410.2006.

- Ferguson, C., Wylde, L. A., Benson, A. P., Cannon, D. T. & Rossiter, H. B. (2016). No reserve in isokinetic cycling power at intolerance during ramp incremental exercise in endurance-trained men. *Journal of Applied Physiology* 120 (1), 70–77. doi:10.1152/jappphysiol.00662.2015.
- Figueira, T. R., Caputo, F., Machado, C. E. & Denadai, B. S. (2008). Aerobic fitness level typical of elite athletes is not associated with even faster VO₂ kinetics during cycling exercise. *Journal of Sports Science & Medicine* 7 (1), 132–138.
- Forbes, S. C., Slade, J. M. & Meyer, R. A. (2008). Short-term high-intensity interval training improves phosphocreatine recovery kinetics following moderate-intensity exercise in humans. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism* 33 (6), 1124–1131. doi:10.1139/H08-099.
- Galan-Rioja, M. A., Gonzalez-Mohino, F., Poole, D. C. & Gonzalez-Rave, J. M. (2020). Relative proximity of critical power and metabolic/ventilatory thresholds: Systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine* 50 (10), 1771–1783. doi:10.1007/s40279-020-01314-8.
- García-Pallarés, J., López-Gullón, J. M., Muriel, X., Díaz, A. & Izquierdo, M. (2011). Physical fitness factors to predict male Olympic wrestling performance. *European journal of applied physiology* 111 (8), 1747–1758. doi:10.1007/s00421-010-1809-8.
- Gejl, K. D., Andersson, E. P., Nielsen, J., Holmberg, H. C. & Ortenblad, N. (2020). Effects of acute exercise and training on the sarcoplasmic reticulum Ca²⁺ release and uptake rates in highly trained endurance athletes. *Frontiers in Physiology* 11, 810. doi:10.3389/fphys.2020.00810.
- Gejl, K. D., Ortenblad, N., Andersson, E., Plomgaard, P., Holmberg, H. C. & Nielsen, J. (2017). Local depletion of glycogen with supramaximal exercise in human skeletal muscle fibres. *The Journal of Physiology* 595 (9), 2809–2821. doi:10.1113/JP273109.
- Gifford, J. R., Garten, R. S., Nelson, A. D., Trinity, J. D., Layec, G., Witman, M. A., Weavil, J. C., Mangum, T., Hart, C., Etheredge, C., Jessop, J., Bledsoe, A., Morgan, D. E., Wray, D. W., Rossman, M. J. & Richardson, R. S. (2016). Symmorphosis and skeletal muscle VO₂ max : in vivo and in vitro measures reveal differing constraints in the exercise-trained and untrained human. *The Journal of Physiology* 594 (6), 1741–1751. doi:10.1113/JP271229.
- Glaister, M., Pattison, J. R., Dancy, B. & McInnes, G. (2014). The influence of aerobic fitness on the recovery of peak power output. *European Journal of Applied Physiology* 114 (11), 2447–2454. doi:10.1007/s00421-014-2968-9.

- Goulding, R. P., Rossiter, H. B., Marwood, S. & Ferguson, C. (2021). Bioenergetic mechanisms linking V O₂ kinetics and exercise tolerance. *Exercise and Sport Sciences Reviews* 49 (4), 274–283. doi:10.1249/JES.0000000000000267.
- Grassi, B., Hogan, M. C. & Gladden, L. B. (2021). Microvascular O₂ delivery and O₂ utilization during metabolic transitions in skeletal muscle. One-hundred years after the pioneering work by August Krogh. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology* 252, 110842. doi:10.1016/j.cbpa.2020.110842.
- Green, H. J., Ballantyne, C. S., MacDougall, J. D., Tarnopolsky, M. A. & Schertzer, J. D. (2003). Adaptations in human muscle sarcoplasmic reticulum to prolonged submaximal training. *Journal of applied physiology* 94 (5), 2034–2042. doi:10.1152/jappphysiol.00244.2002.
- Green, H. J., Grange, F., Chin, C., Goreham, C. & Ranney, D. (1998). Exercise-induced decreases in sarcoplasmic reticulum Ca(2+)-ATPase activity attenuated by high-resistance training. *Acta physiologica Scandinavica* 164 (2), 141–146. doi:10.1046/j.1365-201X.1998.00425.x.
- Guzman, S., Ramirez, J., Keslacy, S., de Leon, R., Yamazaki, K. & Dy, C. (2020). Association between muscle aerobic capacity and whole-body peak oxygen uptake. *European Journal of Applied Physiology* 120 (9), 2029–2036. doi:10.1007/s00421-020-04402-9.
- Hamada, T., Sale, D. G., MacDougall, J. D. & Tarnopolsky, M. A. (2003). Interaction of fibre type, potentiation and fatigue in human knee extensor muscles. *Acta Physiologica Scandinavica* 178 (2), 165–173. doi: 10.1046/j.1365-201X.2003.01121.x.
- Haseler, L. J., Hogan, M. C. & Richardson, R. S. (1999). Skeletal muscle phosphocreatine recovery in exercise-trained humans is dependent on O₂ availability. *Journal of Applied Physiology* 86 (6), 2013–2018. doi:10.1152/jappl.1999.86.6.2013.
- Heskamp, L., Lebbink, F., van Uden, M. J., Maas, M. C., Claassen, J A H R, Froeling, M., Kemp, G. J., Boss, A. & Heerschap, A. (2021). Post-exercise intramuscular O₂ supply is tightly coupled with a higher proximal-to-distal ATP synthesis rate in human tibialis anterior. *The Journal of Physiology* 599 (5), 1533–1550. doi:10.1113/JP280771.
- Heubert, R. A., Billat, V. L., Chassaing, P., Bocquet, V., Morton, R. H., Koralsztein, J. P. & di Prampero, P. E. (2005). Effect of a previous sprint on the parameters of the work-time to exhaustion relationship in high intensity cycling. *International Journal of Sports Medicine* 26 (7), 583–592. doi:10.1055/s-2004-830335.

- Hill, D. W., Poole, D. C. & Smith, J. C. (2002). The relationship between power and the time to achieve $\dot{V}O_{2\max}$. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 34 (4), 709–714. doi:10.1097/00005768-200204000-00023.
- Hug, F., Grelot, L., Le Fur, Y., Cozzone, P. J. & Bendahan, D. (2006). Recovery kinetics throughout successive bouts of various exercises in elite cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 38 (12), 2151–2158. doi:10.1249/01.mss.0000235882.86734.9a.
- Hureau, T. J., Broxterman, R. M. & Weavil, J. C. (2016). The mechanistic basis of the power-time relationship: potential role of the group III/IV muscle afferents. *The Journal of Physiology* 594 (24), 7165–7166. doi:10.1113/JP273333.
- Inglis, E. C., Iannetta, D. & Murias, J. M. (2021). Association between [Formula: see text] $\dot{V}O_2$ kinetics and [Formula: see text] $\dot{V}O_{2\max}$ in groups differing in fitness status. *European Journal of Applied Physiology* 121 (7), 1921–1931. 10.1007/s00421-021-04623-6.
- James, L. P., Haff, G. G., Kelly, V. G. & Beckman, E. M. (2016). Towards a determination of the physiological characteristics distinguishing successful mixed martial arts athletes: a systematic review of combat sport literature. *Sports Medicine* 46 (10), 1525–1551. doi:10.1007/s40279-016-0493-1.
- Jamnick, N. A., Botella, J., Pyne, D. B. & Bishop, D. J. (2018). Manipulating graded exercise test variables affects the validity of the lactate threshold and [Formula: see text]. *PLoS One* 13 (7), e0199794. doi:10.1371/journal.pone.0199794.
- Jones, A. M. & Carter, H. (2000). The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. *Sports Medicine* 29 (6), 373–386. doi:10.2165/00007256-200029060-00001.
- Jones, A. M. & Poole, D. C. (2005). Oxygen uptake dynamics: from muscle to mouth--an introduction to the symposium. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 37 (9), 1542–1550. doi:00005768-200509000-00014.
- Jones, A. M., Wilkerson, D. P., Burnley, M. & Koppo, K. (2003). Prior heavy exercise enhances performance during subsequent perimaximal exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 35 (12), 2085–2092. doi:10.1249/01.MSS.0000099108.55944.C4.
- Joyner, M. J. & Dominelli, P. B. (2021). Central cardiovascular system limits to aerobic capacity. *Experimental physiology* 106 (12), 2299–2303. doi:10.1113/EP088187.
- Jubrias, S. A., Crowther, G. J., Shankland, E. G., Gronka, R. K. & Conley, K. E. (2003). Acidosis inhibits oxidative phosphorylation in contracting human skeletal muscle in vivo. *The Journal of Physiology* 553 (Pt 2), 589–599. doi:10.1113/jphysiol.2003.045872.

- Kachouri, M., Vandewalle, H., Huet, M., Thomaidis, M., Jousselin, E. & Monod, H. (1996). Is the exhaustion time at maximal aerobic speed an index of aerobic endurance? *Archives of Physiology and Biochemistry* 104 (3), 330–336. doi:10.1076/apab.104.3.330.12901.
- Karsten, B., Baker, J., Naclerio, F., Klose, A., Bianco, A. & Nimmerichter, A. (2018). Time Trials Versus Time-to-Exhaustion Tests: Effects on Critical Power, W' , and Oxygen-Uptake Kinetics. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 13 (2), 183–188. doi:10.1123/ijsp.2016-0761.
- Karsten, B., Hopker, J., Jobson, S. A., Baker, J., Petrigna, L., Klose, A. & Beedie, C. (2017). Comparison of inter-trial recovery times for the determination of critical power and W' in cycling. *Journal of Sports Sciences* 35 (14), 1420–1425. doi:10.1080/02640414.2016.1215500.
- Karsten, B., Jobson, S. A., Hopker, J., Stevens, L. & Beedie, C. (2015). Validity and reliability of critical power field testing. *European Journal of Applied Physiology* 115 (1), 197–204. doi:10.1007/s00421-014-3001-z.
- Knaier, R., Infanger, D., Niemeyer, M., Cajochen, C. & Schmidt-Trucksass, A. (2019). In Athletes, the Diurnal Variations in Maximum Oxygen Uptake Are More Than Twice as Large as the Day-to-Day Variations. *Frontiers in Physiology* 10, 219. doi:10.3389/fphys.2019.00219.
- Kordi, M., Menzies, C. & Parker Simpson, L. (2018). Relationship between power-duration parameters and mechanical and anthropometric properties of the thigh in elite cyclists. *European Journal of Applied Physiology* 118 (3), 637–645. doi:10.1007/s00421-018-3807-1.
- Kordi, M., Parker Simpson, L., Thomas, K., Goodall, S., Maden-Wilkinson, T., Menzies, C. & Howatson, G. (2021). The Relationship Between Neuromuscular Function and the W' in Elite Cyclists. *International journal of sports physiology and performance* 16 (11), 1656–1662. doi: 10.1123/ijsp.2020-0861.
- Krüger, R. L., Aboodarda, S. J., Jaimes, L. M., MacIntosh, B. R., Samozino, P. & Millet, G. Y. (2019). Fatigue and recovery measured with dynamic properties versus isometric force: effects of exercise intensity. *The Journal of experimental biology* 222 (Pt 9), jeb197483. doi:10.1242/jeb.197483.
- Krustrup, P., Soderlund, K., Mohr, M. & Bangsbo, J. (2004). The slow component of oxygen uptake during intense, sub-maximal exercise in man is associated with additional fibre recruitment. *Pflügers Archiv : European Journal of Physiology* 447 (6), 855-866. doi:10.1007/s00424-003-1203-z.

- Lagerwaard, B., Keijer, J., McCully, K. K., de Boer, V C J & Nieuwenhuizen, A. G. (2019). In vivo assessment of muscle mitochondrial function in healthy, young males in relation to parameters of aerobic fitness. *European Journal of Applied Physiology* 119 (8), 1799–1808. doi:10.1007/s00421-019-04169-8.
- Laursen, P. B., Shing, C. M. & Jenkins, D. G. (2003). Reproducibility of the cycling time to exhaustion at VO₂peak in highly trained cyclists. *Canadian Journal of Applied Physiology* 28 (4), 605–615. doi:10.1139/h03-046.
- Layec, G., Bringard, A., Le Fur, Y., Micallef, J. P., Vilmen, C., Perrey, S., Cozzone, P. J. & Bendahan, D. (2016). Mitochondrial Coupling and Contractile Efficiency in Humans with High and Low V O₂peaks. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 48 (5), 811–821. doi:10.1249/MSS.0000000000000858
- Layec, G., Malucelli, E., Le Fur, Y., Manners, D., Yashiro, K., Testa, C., Cozzone, P. J., Iotti, S. & Bendahan, D. (2013). Effects of exercise-induced intracellular acidosis on the phosphocreatine recovery kinetics: a ³¹P MRS study in three muscle groups in humans. *NMR in Biomedicine* 26 (11), 1403–1411. doi:10.1002/nbm.2966.
- Lepretre, P. M., Koralsztejn, J. P. & Billat, V. L. (2004). Effect of exercise intensity on relationship between VO₂max and cardiac output. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 36 (8), 1357–1363. doi:00005768-200408000-00014.
- Li, J. L., Wang, X. N., Fraser, S. F., Carey, M. F., Wrigley, T. V. & McKenna, M. J. (2002). Effects of fatigue and training on sarcoplasmic reticulum Ca(2+) regulation in human skeletal muscle. *Journal of applied physiology* 92 (3), 912–922. doi:10.1152/jappphysiol.00643.2000.
- Lievens, E., Klass, M., Bex, T. & Derave, W. (2020). Muscle fiber typology substantially influences time to recover from high-intensity exercise. *Journal of Applied Physiology* 128 (3), 648–659. doi:10.1152/jappphysiol.00636.2019.
- Linari, M., Caremani, M. & Lombardi, V. (2010). A kinetic model that explains the effect of inorganic phosphate on the mechanics and energetics of isometric contraction of fast skeletal muscle. *Proceedings.Biological Sciences* 277 (1678), 19–27. doi:10.1098/rspb.2009.1498.
- Maciejewski, H., Bourdin, M., Feasson, L., Dubouchaud, H. & Messonnier, L. A. (2020). Non-oxidative Energy Supply Correlates with Lactate Transport and Removal in Trained Rowers. *International Journal of Sports Medicine* 41 (13), 936–943. doi:10.1055/a-1186–1761.

- Matolin, S., Vaverka, F., Lunak, J., Novak, J., Horak, V. & Krejci, P. (1994). Histochemical and functional parameters in Nordic combination athletes. *Physiological Research* 43 (4), 243–251.
- McGowan, C. J., Pyne, D. B., Thompson, K. G. & Rattray, B. (2015). Warm-Up Strategies for Sport and Exercise: Mechanisms and Applications. *Sports Medicine* 45 (11), 1523–1546. doi:10.1007/s40279-015-0376-x.
- McMorris, T., Barwood, M. & Corbett, J. (2018). Central fatigue theory and endurance exercise: Toward an interoceptive model. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 93, 93–107. doi:10.1016/j.neubiorev.2018.03.024.
- Midgley, A. W., McNaughton, L. R. & Carroll, S. (2007). Physiological determinants of time to exhaustion during intermittent treadmill running at vV_{O2max} . *International Journal of Sports Medicine* 28 (4), 273–280. doi:10.1055/s-2006-924336.
- Mira, J., Floreani, M., Savoldelli, A., Amery, K., Koral, J., Oranchuk, D. J., Messonnier, L. A., Rupp, T. & Millet, G. Y. (2020). Neuromuscular Fatigue of Cycling Exercise in Hypoxia. *Medicine and science in sports and exercise* 52 (9), 1888–1899. doi:10.1249/MSS.0000000000002331.
- Mira, J., Aboodarda, S. J., Floreani, M., Jaswal, R., Moon, S. J., Amery, K., Rupp, T. & Millet, G. Y. (2018). Effects of endurance training on neuromuscular fatigue in healthy active men. Part I: Strength loss and muscle fatigue. *European journal of applied physiology* 118 (11), 2281–2293. doi:10.1007/s00421-018-3950-8.
- Mitchell, E. A., Martin, N. R. W., Bailey, S. J. & Ferguson, R. A. (2018). Critical power is positively related to skeletal muscle capillarity and type I muscle fibers in endurance-trained individuals. *Journal of Applied Physiology* 125 (3), 737–745. doi:10.1152/jappphysiol.01126.2017.
- Mitchell, E. A., Martin, N. R. W., Turner, M. C., Taylor, C. W. & Ferguson, R. A. (2019). The combined effect of sprint interval training and postexercise blood flow restriction on critical power, capillary growth, and mitochondrial proteins in trained cyclists. *Journal of Applied Physiology* 126 (1), 51-59. doi:10.1152/jappphysiol.01082.2017
- Miyagi, W. E., de Poli, R. A., Papoti, M., Bertuzzi, R. & Zagatto, A. M. (2017). Anaerobic Capacity estimated in A Single Supramaximal Test in Cycling: Validity and Reliability Analysis. *Scientific Reports* 7, 42485. doi:10.1038/srep42485.
- Moll, K., Gussew, A., Nisser, M., Derlien, S., Kramer, M. & Reichenbach, J. R. (2018). Comparison of metabolic adaptations between endurance- and sprint-trained athletes

- after an exhaustive exercise in two different calf muscles using a multi-slice (31) P-MR spectroscopic sequence. *NMR in Biomedicine* 31 (4), e3889. doi:10.1002/nbm.3889.
- Monod, H. & Scherrer, J. 1965. The work capacity of a synergic muscle group. *Ergonomics* 8 (3), 329–338. doi:10.1080/00140136508930810.
- Moral-Gonzalez, S., Gonzalez-Sanchez, J., Valenzuela, P. L., Garcia-Merino, S., Barbado, C., Lucia, A., Foster, C. & Barranco-Gil, D. (2020). Time to Exhaustion at the Respiratory Compensation Point in Recreational Cyclists. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (17), 6352. doi:10.3390/ijerph17176352.
- Morgan, P. T., Black, M. I., Bailey, S. J., Jones, A. M. & Vanhatalo, A. (2019). Road cycle TT performance: Relationship to the power-duration model and association with FTP. *Journal of Sports Sciences* 37 (8), 902–910. doi:10.1080/02640414.2018.1535772.
- Moritani, T., Nagata, A., deVries, H. A. & Muro, M. (1981). Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics* 24 (5), 339–350. doi:10.1080/00140138108924856
- Morton, R. H. (2011). Why peak power is higher at the end of steeper ramps: an explanation based on the "critical power" concept. *Journal of Sports Sciences* 29 (3), 307–309. doi:10.1080/02640414.2010.534809.
- Muniz-Pumares, D., Karsten, B., Triska, C. & Glaister, M. (2019). Methodological Approaches and Related Challenges Associated With the Determination of Critical Power and Curvature Constant. *Journal of Strength and Conditioning Research* 33 (2), 584–596. doi:10.1519/JSC.0000000000002977.
- Muniz-Pumares, D., Pedlar, C., Godfrey, R. & Glaister, M. (2017). A comparison of methods to estimate anaerobic capacity: Accumulated oxygen deficit and W' during constant and all-out work-rate profiles. *Journal of Sports Sciences* 35 (23), 2357–2364. doi:10.1080/02640414.2016.1267386.
- Munkvik, M., Rehn, T. A., Slettaløkken, G., Hasic, A., Hallén, J., Sjaastad, I., Sejersted, O. M. & Lunde, P. K. (2010). Training effects on skeletal muscle calcium handling in human chronic heart failure. *Medicine and science in sports and exercise* 42 (5), 847–855. doi:10.1249/MSS.0b013e3181c29ec1.
- Murgatroyd, S. R., Ferguson, C., Ward, S. A., Whipp, B. J. & Rossiter, H. B. (2011). Pulmonary O₂ uptake kinetics as a determinant of high-intensity exercise tolerance in humans. *Journal of Applied Physiology* 110 (6), 1598–1606. doi:10.1152/jappphysiol.01092.2010.

- Neyroud, D., Kayser, B. & Place, N. (2016). Are There Critical Fatigue Thresholds? Aggregated vs. Individual Data. *Frontiers in Physiology* 7, 376. doi:10.3389/fphys.2016.00376.
- Nikooie, R., Cheraghi, M. & Mohamadipour, F. (2017). Physiological determinants of wrestling success in elite Iranian senior and junior Greco-Roman wrestlers. *The Journal of sports medicine and physical fitness* 57 (3), 219–226. doi:10.23736/S0022-4707.16.06017-5.
- Nixon, R. J., Kranen, S. H., Vanhatalo, A. & Jones, A. M. (2021). Steady-state [Formula: see text] above MLSS: evidence that critical speed better represents maximal metabolic steady state in well-trained runners. *European journal of applied physiology* 121 (11), 3133–3144. doi:10.1007/s00421-021-04780-8.
- O'Leary, T. J., Collett, J., Howells, K. & Morris, M. G. (2017). Endurance capacity and neuromuscular fatigue following high- vs moderate-intensity endurance training: A randomized trial. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 27 (12), 1648–1661. doi:10.1111/sms.12854.
- Ortenblad, N., Lunde, P. K., Levin, K., Andersen, J. L. & Pedersen, P. K. (2000). Enhanced sarcoplasmic reticulum Ca(2+) release following intermittent sprint training. *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology* 279 (1), R152–R160. doi:10.1152/ajpregu.2000.279.1.R152
- Ortenblad, N., Nielsen, J., Boushel, R., Soderlund, K., Saltin, B. & Holmberg, H. C. (2018). The Muscle Fiber Profiles, Mitochondrial Content, and Enzyme Activities of the Exceptionally Well-Trained Arm and Leg Muscles of Elite Cross-Country Skiers. *Frontiers in Physiology* 9, 1031. doi:10.3389/fphys.2018.01031.
- Ortenblad, N., Westerblad, H. & Nielsen, J. (2013). Muscle glycogen stores and fatigue. *The Journal of Physiology* 591 (18), 4405–4413. doi:10.1113/jphysiol.2013.251629.
- Pallares, J. G., Lillo-Bevia, J. R., Moran-Navarro, R., Cerezuela-Espejo, V. & Mora-Rodriguez, R. (2020). Time to exhaustion during cycling is not well predicted by critical power calculations. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism* 45 (7), 753–760. doi:10.1139/apnm-2019-0637.
- Poole, D. C., Burnley, M., Vanhatalo, A., Rossiter, H. B. & Jones, A. M. (2016). Critical Power: An Important Fatigue Threshold in Exercise Physiology. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 48 (11), 2320–2334. doi:10.1249/MSS.0000000000000939.
- Poole, D. C. & Jones, A. M. (2012). Oxygen uptake kinetics. *Comprehensive Physiology* 2 (2), 933–996. doi:10.1002/cphy.c100072.

- Poole, D. C., Schaffartzik, W., Knight, D. R., Derion, T., Kennedy, B., Guy, H. J., Prediletto, R. & Wagner, P. D. (1991). Contribution of exercising legs to the slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *Journal of Applied Physiology* 71 (4), 1245–1260. doi:10.1152/jap.1991.71.4.1245.
- Poole, D. C., Ward, S. A., Gardner, G. W. & Whipp, B. J. (1988). Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics* - 0373220 31 (9), 1265–1279. doi:10.1080/00140138808966766.
- Possamai, L. T., Campos, F. S., Salvador, P. C. D. N., de Aguiar, R. A., Guglielmo, L. G. A., de Lucas, R. D., Caputo, F. & Turnes, T. (2020). Similar maximal oxygen uptake assessment from a step cycling incremental test and verification tests on the same or different day. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism* 45 (4), 357–361. doi:10.1139/apnm-2019-0405.
- Pringle, J. S., Doust, J. H., Carter, H., Tolfrey, K., Campbell, I. T., Sakkas, G. K. & Jones, A. M. (2003). Oxygen uptake kinetics during moderate, heavy and severe intensity "submaximal" exercise in humans: the influence of muscle fibre type and capillarisation. *European Journal of Applied Physiology* 89 (3–4), 289–300. doi:10.1007/s00421-003-0799-1.
- Raimundo, J. A. G., Turnes, T., de Aguiar, R. A., Lisboa, F. D., Loch, T., Ribeiro, G. & Caputo, F. (2019). The Severe Exercise Domain Amplitude: A Comparison Between Endurance Runners and Cyclists. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 90 (1), 3–13. doi:10.1080/02701367.2018.1549356.
- Renoux, J. C., Petit, B., Billat, V. & Koralsztein, J. P. (1999). Oxygen deficit is related to the exercise time to exhaustion at maximal aerobic speed in middle distance runners. *Archives of Physiology and Biochemistry* 107 (4), 280–285. doi:10.1076/13813455199908107041qft280.
- Robergs, R. A. (2014). A critical review of the history of low- to moderate-intensity steady-state VO₂ kinetics. *Sports Medicine* 44 (5), 641–653. doi:10.1007/s40279-014-0161-2.
- Rønnestad, B. R. (2014). Comparing two methods to assess power output associated with peak oxygen uptake in cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research* 28 (1), 134–139. doi:10.1519/JSC.0b013e3182987327.
- Rossiter, H. B., Ward, S. A., Kowalchuk, J. M., Howe, F. A., Griffiths, J. R. & Whipp, B. J. (2002). Dynamic asymmetry of phosphocreatine concentration and O₂ uptake between the on- and off-transients of moderate- and high-intensity exercise in humans. *The Journal of Physiology* 541 (Pt 3), 991–1002. doi:10.1113/jphysiol.2001.012910.

- Sawyer, B. J., Stokes, D. G., Womack, C. J., Morton, R. H., Weltman, A. & Gaesser, G. A. (2014). Strength training increases endurance time to exhaustion during high-intensity exercise despite no change in critical power. *Journal of Strength and Conditioning Research* 28 (3), 601–609. doi:10.1519/JSC.0b013e31829e113b.
- Schafer, L. U., Hayes, M. & Deckerle, J. (2019a). Creatine supplementation improves performance above critical power but does not influence the magnitude of neuromuscular fatigue at task failure. *Experimental Physiology* 104 (12), 1881–1891. doi:10.1113/EP087886.
- Schafer, L. U., Hayes, M. & Deckerle, J. (2019b). The magnitude of neuromuscular fatigue is not intensity dependent when cycling above critical power but relates to aerobic and anaerobic capacities. *Experimental Physiology* 104 (2), 209–219. doi:10.1113/EP087273.
- Scheuermann, B. W. & Barstow, T. J. (2003). O₂ uptake kinetics during exercise at peak O₂ uptake. *Journal of Applied Physiology* 95 (5), 2014–2022. doi:10.1152/jappphysiol.00590.2002.
- Schiaffino, S. & Reggiani, C. (2011). Fiber types in mammalian skeletal muscles. *Physiological Reviews* 91 (4), 1447–1531. doi:10.1152/physrev.00031.2010.
- Sidhu, S. K., Weavil, J. C., Mangum, T. S., Jessop, J. E., Richardson, R. S., Morgan, D. E. & Amann, M. (2017). Group III/IV locomotor muscle afferents alter motor cortical and corticospinal excitability and promote central fatigue during cycling exercise. *Clinical Neurophysiology : Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology* 128 (1), 44-55. S1388-2457(16)30555-7.
- Simola, T. (2021). Maksimaalisen aerobisen kapasiteetin vaikutus kappailijoiden palautumiskykyyn vuorokauden palautumisajalla intensiivisestä kestävyyskuormituksesta. Jyväskylän yliopisto. Liikuntatieteellinen tiedekunta. Pro gradu -tutkielma. Viitattu 31.3.2022. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:ju-202112085889>.
- Simpson, L. P., Jones, A. M., Skiba, P. F., Vanhatalo, A. & Wilkerson, D. (2015). Influence of hypoxia on the power-duration relationship during high-intensity exercise. *International Journal of Sports Medicine* 36 (2), 113–119. doi:10.1055/s-0034-1389943.
- Skiba, P. F., Fulford, J., Clarke, D. C., Vanhatalo, A. & Jones, A. M. (2015). Intramuscular determinants of the ability to recover work capacity above critical power. *European Journal of Applied Physiology* 115 (4), 703–713. doi:10.1007/s00421-014-3050-3.
- Skovgaard, C., Almquist, N. W. & Bangsbo, J. (2017). Effect of increased and maintained frequency of speed endurance training on performance and muscle adaptations in

- runners. *Journal of applied physiology* 122 (1), 48–59. doi:10.1152/jappphysiol.00537.2016.
- Soderlund, K. & Hultman, E. (1991). ATP and phosphocreatine changes in single human muscle fibers after intense electrical stimulation. *The American Journal of Physiology* 261 (6 Pt 1), 737. doi:10.1152/ajpendo.1991.261.6.E737.
- Sousa, A. C., Fernandes, R. J., Boas, J. P. V. & Figueiredo, P. (2018). High-intensity Interval Training in Different Exercise Modes: Lessons from Time to Exhaustion. *International Journal of Sports Medicine* 39 (9), 668–673. doi:10.1055/a-0631-2682.
- Sousa, A., Figueiredo, P., Zamparo, P., Pyne, D. B., Vilas-Boas, J. P. & Fernandes, R. J. (2015a). Exercise Modality Effect on Bioenergetical Performance at V_{O2max} Intensity. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 47 (8), 1705–1713. doi:10.1249/MSS.0000000000000580.
- Sousa, A., Rodriguez, F. A., Machado, L., Vilas-Boas, J. P. & Fernandes, R. J. (2015b). Exercise modality effect on oxygen uptake off-transient kinetics at maximal oxygen uptake intensity. *Experimental Physiology* 100 (6), 719–729. doi:10.1113/EP085014.
- Souza, K. M., de Lucas, R. D., do Nascimento Salvador, P C, Guglielmo, L. G., Carita, R. A., Greco, C. C. & Denadai, B. S. (2015). Maximal power output during incremental cycling test is dependent on the curvature constant of the power-time relationship. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism* 40 (9), 895–898. doi:10.1139/apnm-2015-0090.
- Sundberg, C. W., Hunter, S. K., Trappe, S. W., Smith, C. S. & Fitts, R. H. (2018). Effects of elevated H^+ and P_i on the contractile mechanics of skeletal muscle fibres from young and old men: implications for muscle fatigue in humans. *The Journal of Physiology* 596 (17), 3993–4015. doi:10.1113/JP276018.
- Swisher, A. R., Koehn, B., Yong, S., Cunha, J., Ferguson, C. & Cannon, D. T. (2019). Dynamics of Locomotor Fatigue during Supra-critical Power Exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 51 (8), 1720–1726. doi:10.1249/MSS.0000000000001965.
- Temesi, J., Mattioni Maturana, F., Peyrard, A., Piucco, T., Murias, J. M. & Millet, G. Y. (2017). The relationship between oxygen uptake kinetics and neuromuscular fatigue in high-intensity cycling exercise. *European Journal of Applied Physiology* 117 (5), 969–978. doi:10.1007/s00421-017-3585-1.
- Thomas, C., Bishop, D. J., Lambert, K., Mercier, J. & Brooks, G. A. (2012). Effects of acute and chronic exercise on sarcolemmal MCT1 and MCT4 contents in human skeletal

- muscles: current status. *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 302 (1), 1. doi:10.1152/ajpregu.00250.2011
- Thomas, C., Perrey, S., Lambert, K., Hugon, G., Mornet, D. & Mercier, J. (2005). Monocarboxylate transporters, blood lactate removal after supramaximal exercise, and fatigue indexes in humans. *Journal of Applied Physiology* 98 (3), 804–809. doi:10.1152/jappphysiol.01057.2004.
- Thomas, K., Elmeua, M., Howatson, G. & Goodall, S. (2016). Intensity-Dependent Contribution of Neuromuscular Fatigue after Constant-Load Cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 48 (9), 1751–1760. doi:10.1249/MSS.0000000000000950.
- Tomlin, D. L. & Wenger, H. A. (2001). The relationship between aerobic fitness and recovery from high intensity intermittent exercise. *Sports Medicine* 31 (1), 1–11. doi:10.2165/00007256-200131010-00001.
- Torres-Peralta, R., Morales-Alamo, D., Gonzalez-Izal, M., Losa-Reyna, J., Perez-Suarez, I., Izquierdo, M. & Calbet, J. A. (2016). Task Failure during Exercise to Exhaustion in Normoxia and Hypoxia Is Due to Reduced Muscle Activation Caused by Central Mechanisms While Muscle Metaboreflex Does Not Limit Performance. *Frontiers in Physiology* 6, 414. doi:10.3389/fphys.2015.00414.
- Turnes, T., de Aguiar, R. A., Cruz, R. S. & Caputo, F. (2016). Interval training in the boundaries of severe domain: effects on aerobic parameters. *European Journal of Applied Physiology* 116 (1), 161–169. doi:10.1007/s00421-015-3263-0.
- van der Zwaard, S., de Ruiter, C. J., Noordhof, D. A., Sterrenburg, R., Bloemers, F. W., de Koning, J. J., Jaspers, R. T. & van der Laarse, W J. (2016). Maximal oxygen uptake is proportional to muscle fiber oxidative capacity, from chronic heart failure patients to professional cyclists. *Journal of Applied Physiology* 121 (3), 636–645. doi:10.1152/jappphysiol.00355.2016.
- Vanhatalo, A., Black, M. I., DiMenna, F. J., Blackwell, J. R., Schmidt, J. F., Thompson, C., Wylie, L. J., Mohr, M., Bangsbo, J., Krustup, P. & Jones, A. M. (2016). The mechanistic bases of the power-time relationship: muscle metabolic responses and relationships to muscle fibre type. *The Journal of Physiology* 594 (15), 4407–4423. doi:10.1113/JP271879.
- Vanhatalo, A., Doust, J. H. & Burnley, M. (2008). A 3-min all-out cycling test is sensitive to a change in critical power. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 40 (9), 1693–1699. doi:10.1249/MSS.0b013e318177871a.

- Vanhatalo, A., Fulford, J., DiMenna, F. J. & Jones, A. M. (2010). Influence of hyperoxia on muscle metabolic responses and the power-duration relationship during severe-intensity exercise in humans: a ³¹P magnetic resonance spectroscopy study. *Experimental Physiology* 95 (4), 528–540. doi:10.1113/expphysiol.2009.050500.
- Vernillo, G., Temesi, J., Martin, M. & Millet, G. Y. (2019). Do aerobic characteristics explain isometric exercise-induced neuromuscular fatigue and recovery in upper and lower limbs? *Journal of Sports Sciences* 37 (4), 387–395. doi:10.1080/02640414.2018.1504604.
- Wilkerson, D. P., Koppo, K., Barstow, T. J. & Jones, A. M. (2004). Effect of work rate on the functional 'gain' of Phase II pulmonary O₂ uptake response to exercise. *Respiratory Physiology & Neurobiology* 142 (2–3), 211–223. doi:10.1016/j.resp.2004.06.001.
- Yoon, B. K., Kravitz, L. & Robergs, R. (2007). VO₂max, protocol duration, and the VO₂ plateau. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 39 (7), 1186–1192. doi:10.1249/mss.0b13e318054e304.
- Zghal, F., Cottin, F., Kenoun, I., Rebai, H., Moalla, W., Dogui, M., Tabka, Z. & Martin, V. (2015). Improved tolerance of peripheral fatigue by the central nervous system after endurance training. *European Journal of Applied Physiology* 115 (7), 1401–1415. doi:10.1007/s00421-015-3123-y
- Zoladz, J. A., Grassi, B., Majerczak, J., Szkutnik, Z., Korostynski, M., Grandys, M., Jarmuszkiewicz, W. & Korzeniewski, B. (2014). Mechanisms responsible for the acceleration of pulmonary VO₂ on-kinetics in humans after prolonged endurance training. *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 307 (9), 1101. doi:10.1152/ajpregu.00046.2014.
- Zoladz, J. A., Majerczak, J., Grassi, B., Szkutnik, Z., Korostynski, M., Golda, S., Grandys, M., Jarmuszkiewicz, W., Kilarski, W., Karasinski, J. & Korzeniewski, B. (2016). Mechanisms of Attenuation of Pulmonary V'O₂ Slow Component in Humans after Prolonged Endurance Training. *PloS One* 11 (4), e0154135. doi:10.1371/journal.pone.0154135.
- Zuccarelli, L., do Nascimento Salvador, P C, Del Torto, A., Fiorentino, R. & Grassi, B. (2020). Skeletal muscle Vo₂ kinetics by the NIRS repeated occlusions method during the recovery from cycle ergometer exercise. *Journal of Applied Physiology* 128 (3), 534–544. doi:10.1152/jappphysiol.00580.2019.

